

## Endbericht für das FuE Projekt

# InnoDry

Innovatives Verfahren zur Veredelung von Sägenebenprodukten zur Verbesserung der regionalen Absatzmöglichkeit und Versorgungssicherheit von Nah- und Fernwärmenetzen

**Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg**

**Sägewerk Echtle KG.**

**Autor:** M. Sc. Jan Focke, Dipl.-Biol. Nadja Schlör,

Dipl.-Forst-Ing. (FH) Arnold Renner

**Redaktion:** M. Sc. Jan Focke

**Projektleitung:** Prof. Dr. Stefan Pelz, Prof. Dr. Bastian Kaiser



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM  
UND VERBRAUCHERSCHUTZ



investition in  
Ihre Zukunft !

Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung



EUROPÄISCHE UNION

Europäischer Fonds für  
Regionale Entwicklung

**Projektdauer:**

03.12.2010 – 31.08.2014

**Fördernummer:**

051005HFR

**Projektträger:**

Clusterinitiative Forst und Holz in Baden-Württemberg

Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz

Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)

**Verantwortliche Einrichtung:**

Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg

*Kontakt:*

Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg

Schadenweilerhof

D-72108 Rottenburg am Neckar

Prof. Dr. Stefan Pelz

Tel: +49 (7472) 951-235

Fax: +49 (7472) 951-200

E-mail: [pelz@hs-rottenburg.de](mailto:pelz@hs-rottenburg.de)

Web: <http://www.hs-rottenburg.de>

**Firmenpartner:**

Sägewerk Echte KG, Talstraße 12, D-77787 Nordrach

**Für die Förderung zuständiges Ministerium:**

Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz

**Weitere Informationen über das Operationelle Programm:**

Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz

Kernerplatz 10

70182 Stuttgart

[poststelle@mlr.bwl.de](mailto:poststelle@mlr.bwl.de)

[www.rwb-efre.baden-wuerttemberg.de](http://www.rwb-efre.baden-wuerttemberg.de)

© 2014

Rottenburg, August 2014

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung und Rahmenbedingungen des Projektes .....</b>	<b>9</b>
1.1	Zusammensetzung des Entwicklungskonsortiums.....	9
1.2	Möglichkeiten der Integration des neuen Trocknungsverfahrens in relevante Produktionsprozesse.....	10
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens .....</b>	<b>11</b>
2.1	Definitionen themenspezifischer Begriffe.....	11
2.1.1	Heizwert [H <sub>u</sub> ] (früher „unterer“ Heizwert) .....	11
2.1.2	Brennwert [H <sub>o</sub> ] (früher „oberer“ Heizwert) .....	11
2.1.3	Trocknung / Lagerung .....	11
2.1.4	Wassergehalt / Feuchte.....	11
2.1.5	Holzdicke .....	12
2.1.6	Rohdicke .....	13
2.1.7	Darrdicke.....	13
2.1.8	Raumdicke .....	14
2.1.9	Schüttdicke.....	14
2.2	Grundlagen der Holz Trocknung.....	14
2.2.1	Bindung des Wassers im Holzkörper .....	15
2.2.2	Trocknungspotenzial der Luft.....	16
2.3	Strömungswiderstand.....	18
2.4	Belüftungsmenge.....	19
2.5	Trocknungstemperatur .....	19
2.6	Gründe für die Holz Trocknung.....	19
2.6.1	Steigerung des Heizwertes .....	20
2.6.2	Lagerfähigkeit .....	21
2.6.3	Schüttdicke / Gewichtsminderung / Lagervorhaltung .....	22
2.6.4	Verbesserung der feuerungstechnischen Eigenschaften .....	23
2.7	Qualitätskriterien für Sägenebenprodukte.....	24
2.7.1	Elementarzusammensetzung.....	24
2.7.2	Brennstofftechnische Eigenschaften.....	25
2.7.3	Wassergehalt / Holzfeuchte .....	25
2.7.4	Aschegehalt.....	25
2.7.5	Ascheerweichungsverhalten .....	26
2.7.6	Flüchtige Bestandteile .....	26
2.8	Physikalisch-mechanische Eigenschaften .....	26

2.8.1	Stückigkeit.....	27
2.8.2	Größenverteilung und Feinanteil / Fraktionsgrößenverteilung.....	27
2.8.3	Fließeigenschaften / Brückenbildungsneigung / Rieselfähigkeit.....	27
2.8.4	Schüttdichte.....	27
2.8.5	Rohdichte / Schwindmaß.....	27
2.8.6	Abriebfestigkeit.....	28
2.8.7	Energiedichte pro Srm / Umrechnung in Verkaufsmaß.....	28
2.9	Trocknungsverfahren.....	29
2.9.1	Übersicht der Trocknungsverfahren.....	29
2.9.2	Natürliche Trocknung.....	29
2.9.3	Kombinierte Trocknungsverfahren.....	32
2.9.4	Technische Trocknungsverfahren.....	34
2.9.5	Zusammenfassende Beurteilung der Trocknungsverfahren.....	36
2.10	Systeme und Bewertung technischer Trocknungsverfahren.....	36
2.10.1	Satz Trockner.....	36
2.10.2	Durchlauf Trockner (Systeme mit Gutförderung).....	39
2.11	Bewertung von Trocknungsverfahren.....	44
2.11.1	Wirtschaftlichkeit.....	44
2.11.2	Energieeffizienz / Wirkungsgrad / CO <sub>2</sub> -Bilanz.....	45
2.11.3	CO <sub>2</sub> -Bilanz.....	45
2.11.4	Qualität der Trocknung.....	45
2.12	Beispiele für marktverfügbare technische Trocknungsverfahren.....	46
2.12.1	Kontinuierliche Trocknungsverfahren (Durchlauf Trocknung).....	46
2.12.2	Diskontinuierliche Verfahren (Satz Trocknung).....	50
2.12.2.1	Lauber Energie Nutz Zentrale (Lauber Trocknungstechnik).....	50
2.13	Effizienz konventioneller Trocknungsverfahren.....	51
2.14	Umgang mit Emissionen aus der Holztrocknung.....	53
2.14.1	Rechtliche Rahmenbedingungen für Abwasserentsorgung.....	54
2.14.2	Stoffliche Verwertung des Presswassers.....	56
2.15	Empirische Erfahrungen mit mechanischen Trocknungsverfahren.....	57
<b>3</b>	<b>Methodisches Vorgehen.....</b>	<b>61</b>
3.1	Anlagenentwicklung.....	61
3.1.1	Entwicklung der mechanische Trocknung.....	61
3.1.2	Konzeptionierung des Prototyps und Auswahl des Trocknungsmaterials.....	61
3.1.3	Materialförderung.....	62
3.1.4	Entwicklung des Prototyps.....	62

3.1.5	Bau des Prototyps und erste experimentelle Erfahrungen .....	64
3.2	Anlagenerprobung .....	66
3.2.1	Durchführung Vorversuche (Teil 1) .....	66
3.2.2	Durchführung Vorversuche (Teil 2) .....	67
3.2.3	Durchführung Vorversuche (Teil 3) .....	68
3.3	Durchführung Hauptmessreihe .....	69
3.3.1	Baumartenauswahl .....	69
3.3.2	Materialzusammensetzung .....	69
3.3.3	Anlagenspezifische Parameter der Pressung .....	70
3.3.4	Physikalische Qualitätsparameter des Hackgutes .....	71
3.4	Presswasseranalytik .....	71
3.4.1	Abwasserparameter .....	72
3.4.2	Presswasseranalyse Vorversuche .....	73
3.4.3	Presswasseranalyse Hauptmessreihe .....	74
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Anlagenerprobung (Experimente, Vorversuche, Hauptmessreihe) .....</b>	<b>77</b>
4.1	Experimentelle Vorversuche .....	77
4.2	Vorversuch Teil 1 .....	77
4.3	Vorversuch Teil 2 .....	79
4.4	Vorversuch Teil 3 .....	80
4.5	Hauptmessreihe .....	82
4.5.1	Wassergehaltsentwicklung (EN 14774-1:2010) .....	82
4.5.2	Auswirkungen auf die Schüttdichte (EN 15103:2010) .....	83
4.5.3	Auswirkungen auf die Korngrößenverteilung (CEN/TS 15149-1:2010) .....	85
4.5.4	Auswirkungen auf Heiz- und Brennwert .....	88
4.5.5	Aschegehaltsentwicklung .....	90
4.6	Effizienz des Verfahrens .....	91
4.6.1	Verhältnis von Wassergehaltsreduktion zu Energieaufnahme .....	91
4.7	Presswasseranalytik .....	96
4.7.1	Vorversuch .....	96
4.7.2	Hauptmessreihe .....	98
<b>5</b>	<b>Anlagenerprobung - Bewertung der Ergebnisse .....</b>	<b>106</b>
5.1	Experimente, Vorversuche .....	106
5.2	Vorversuche (Teil 1 bis 3) .....	106

5.3	Hauptmessreihe .....	107
5.3.1	Auswirkungen auf den Wassergehalt.....	107
5.3.2	Auswirkung auf die Schüttdichte .....	107
5.3.3	Auswirkung auf die Korngrößenverteilung.....	108
5.3.4	Auswirkung auf den Heizwert.....	108
5.3.5	Auswirkungen auf den Aschegehalt.....	108
5.4	Wirtschaftlichkeit.....	108
5.4.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	108
5.4.2	Mehrstufiges Verfahren / Variantenvergleich .....	110
5.4.3	Stückkostenkalkulation .....	112
5.5	Rückschlüsse aus der Presswasseranalytik.....	114
5.5.1	Abwasserentsorgung.....	114
5.5.2	Organische Belastung und biologische Abbaubarkeit der Presswasser.....	117
5.5.3	Adsorbierbare, organisch gebundene Halogene (AOX).....	118
5.5.4	Schwermetalle .....	118
5.5.5	Nährstoffparameter: Stickstoff und Phosphor .....	118
5.5.6	pH-Wert.....	118
5.5.7	Schlussbetrachtung zur Abwasserentsorgung.....	119
5.5.8	Stoffliche Verwertung der Presswasser.....	120
<b>6</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>121</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>122</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>127</b>
	<b>Literatur online und weitere .....</b>	<b>130</b>

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „InnoDry“ wurde ein neues Verfahren zur Veredelung von Sägenebenprodukten entwickelt. Ziel des Projektes war dabei die Entwicklung eines funktionsfähigen Prototyps für die Entwässerung von waldfrischen Holzhackgut durch den Einsatz einer kontinuierlich betriebenen mechanischen Presse. Das System wurde nach der Entwicklung zur Erprobung in den Produktionsprozess eines Sägewerkes eingebunden. Das Hackgut von Fichte (*Picea abies*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*), Kiefer (*Pinus sylvestris*), Tanne (*Abies alba*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Pappel (*Populus spec.*) wurde dabei vor und nach der Pressung hinsichtlich seiner qualitätsrelevanten physikalischen Eigenschaften untersucht sowie die systemtechnischen Anlagenparameter im Besonderen hinsichtlich der Energieaufnahme bestimmt. Das erzeugte Presswasser wurde vor dem Hintergrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen (Entsorgung) sowohl in Bezug auf Inhaltsstoffe als auch auf mögliche Nutzungsmöglichkeiten hin analysiert.

Durch die entwickelte mechanische Trocknungsmethode gelang es, den Ausgangswassergehalt frischen Hackgutes um über 20 Prozent abzusenken, den Heizwert ( $q_{p, net, ar}$ ) um etwa 50% zu erhöhen sowie den Aschegehalt um bis zu 50% zu reduzieren. Dabei stellt sich das neue Verfahren als deutlich energieeffizienter und wirtschaftlicher dar als die meisten konventionellen Trocknungsverfahren.

Weiterführend wurde die Möglichkeit erläutert, Hackgut durch ein kombiniertes zweistufiges Verfahren aus mechanischer und konventioneller thermischer Trocknung auf ein kundenspezifisch wählbares Niveau von 35-25% Wassergehalt abzusenken. Dabei kann ebenfalls eine sehr hohe Systemeffizienz hinsichtlich Produktivität, Energieverbrauch und Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Durch einen möglichen zukünftigen Einsatz dieser Technik können Sägewerke und andere potenzielle Nutzer die Wertschöpfung bei Haupt- und Nebenprodukten unter qualitativen, wirtschaftlichen sowie ökologisch nachhaltigen Maßstäben signifikant erhöhen sowie die Wettbewerbsfähigkeit ihres Produktportfolios verbessern.

## Abstract

In context of the project “InnoDry”, a new technique for conditioning of sawmill by-products was created. Aim of the project was the development of a functional prototype, capable of draining fresh wood chips, using a continuous feed mechanical press. Thereby the developed system was implemented within the production process of a sawmill. Within the process wood chips of spruce (*Picea abies*), douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*), pine (*Pinus sylvestris*), fir (*Abies alba*), beech (*Fagus sylvatica*) and poplar (*Populus spec.*) were analyzed before and after the compression and the systemic prototype parameters were determined, with a special focus on energy consumption. Additionally the produced pressing water was analyzed according to the regulatory framework (disposal of waste) in terms of chemical ingredients and possible utilization paths.

Due to the mechanical pressing system it was possible to reduce the initial water content of wood chips more than 20 percent, increase the relative calorific value ( $q_{p, net, ar}$ ) around 50% and to reduce ash contents up to 50%. As a result it could be proven, that the new method showed higher energy efficiency and cost effectiveness, as most comparable conventional thermal drying system.

It was also shown, that a combination of a two-stage method of the mechanical drying and a thermal drying system, can provide the opportunity of custom-dried wood chips to a water content level of 35-25%. Thereby a high system-, productivity-, energy- and cost efficiency can be reached. Due to the possible use of this technology it is possible for sawmill companies and other potential users, to improve their value chain of main- and by-products under quality, economic and ecological sustainable criteria, as well as to improve the competitiveness of their product range.

# 1 Zielsetzung und Rahmenbedingungen des Projektes

Ziel des Projektes InnoDry ist die Entwicklung ein mechanischen Verfahrens zur Trocknung von Sägenebenprodukten (SNP: Hackschnitzel, Sägemehl, Rinde), das mit einem thermischen Nachtrocknungsverfahren kombiniert werden kann. Damit soll erreicht werden, dass ein möglichst hoher Anteil des freien, nicht in der Zellwand gebundenen Wassers mechanisch entfernt und damit der gesamte Trocknungsprozess im Vergleich zu den meist eingesetzten thermischen Verfahren effizienter und wirtschaftlicher gestaltet werden kann.

Das Projekt dient damit der Erreichung folgender übergeordneter Ziele:

- Schaffung einer Möglichkeit, SNP kostengünstig zu veredeln.
- Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen der Sägeindustrie durch Schaffung von zusätzlichen Absatzmöglichkeiten.
- Erhöhung der Energie- und Rohstoffeffizienz in Konversionsprozessen der holzbearbeitenden Industrie.
- Erhöhung der Substitutionsquote von fossiler Energie sowie Abmilderung des Konfliktes zwischen stofflichen und energetischen Energieträgern.

Nach der Erstellung einer Übersicht der derzeitig vorhandenen Trocknungstechnologien sowie deren Bewertung hinsichtlich Wirkungsgrad und Auswirkung auf die Qualitätsparameter von SNP wird in Zusammenarbeit mit den beteiligten Industriepartnern ein konkreter Versuchs- und Entwicklungsplan für ein innovatives Trocknungsverfahren erstellt. Das Trocknungsverfahren wird auf Basis eines Prototyps erprobt und weiterentwickelt. Eine weiterentwickelbare vorwettbewerbliche Stufe soll realisiert werden.

Die generierten Brennstoffe aus diesem Trocknungssystem werden nach Baumarten getrennt auf qualitätsbestimmende Eigenschaften gemäß DIN EN 14961-1 untersucht. Dabei werden die Qualitätsparameter Wassergehalt, Aschegehalt, Korngrößenverteilung mit Feingutanteil, Schüttdichte sowie Brenn- und Heizwert erhoben.

Das durch das mechanische Trocknungssystem entfernte Presswasser wird nach Baumarten getrennt hinsichtlich der Inhaltstoffe qualitativ sowie quantitativ analysiert. Auf Basis dieser Ergebnisse sowie weiterer Labortests hinsichtlich der natürlichen Abbaubarkeit wird ein konkretes Entsorgungskonzept für zwei in Frage kommende Standorte entwickelt.

## 1.1 Zusammensetzung des Entwicklungskonsortiums

Das Konsortium zur konzeptionellen Entwicklung, zur technischen Umsetzung, Weiterentwicklung sowie der praxistechnischen Erprobung des entwickelten Prototyps setzt sich aus den unten aufgeführten Partnern zusammen (siehe untere Abb.).

### Projektpartner:

- Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg, Schadenweilerhof, 72108 Rottenburg
- Sägewerk Echtle KG, Talstraße 12, 77787 Nordrach

### Assoziierte Partner:

- Sägewerk & Holzhandlung Bohnert, Geisdörfle 17, 77889 Seebach
- (ausgeschieden) Vecoplan AG, Vor der Bitz 10, 56470 Bad Marienberg



**Abbildung 1:** Zusammensetzung des Entwicklungskonsortiums

## 1.2 Möglichkeiten der Integration des neuen Trocknungsverfahrens in relevante Produktionsprozesse

Folgende Prozessschritte in Verbindung mit dem neuen mechanischen Trocknungsverfahren (TV) zur Veredelung von Hackgut (HG) bei folgenden Nutzertypen sind denkbar:

### Stoffliche Nutzer / Produzenten

- Sägewerke
- Hobelwerke
- Holzwerkstoffhersteller

### Energetische Nutzer / Produzenten

- Biomassehöfe
- Pelletwerke
- Heiz-(kraft)werke

**Tabelle 1:** Varianten für den Einsatz eines mechanischen Trocknungssystems

Variante	Prozessschritte				
1	HG-Anfall im Werk	<b>Mech. TV</b>	Therm. TV	Nutzung, ggf. Lagerung, Transport zum Endverbraucher	
2	HG-Anfall im Werk	<b>Mech. TV</b>	Natürl. TV	Ggf. Lagerung, Transport zum Endverbraucher	
3	HG-Anfall im Werk	<b>Mech. TV</b>	Transport zum Endverbraucher		
4	HG-Anfall im Werk	<b>Mech. TV</b>	Lagerung	Therm. / Natürl. TV	Transport zum Endverbraucher
5	HG-Anfall im Werk	<b>Mech. TV</b>	Nutzung		

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Definitionen themenspezifischer Begriffe

Aufgrund eines vielfach missverständlichen und unsachgemäßen Gebrauchs technischer Begriffe in der Praxis der Trocknung von Holz ist eine kurze Beschreibung und Klarstellung der wichtigsten im Hinblick auf das methodische Vorgehen sowie auf die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse relevanten Parameter sinnvoll.

#### 2.1.1 Heizwert [ $H_u$ ] (früher „unterer“ Heizwert)

Der Heizwert ist diejenige Wärmemenge die bei vollständiger Oxidation eines Brennstoffs freigesetzt wird. Die Kondensationswärme (Verdampfungswärme) wird dabei nicht berücksichtigt (KALTSCHMITT 2009, S. 348). Die Verdunstung des Wassers während der Oxidation vermindert somit die verfügbare Energie (Wärme). Zur Verdunstung des Wassers wird eine Wärmemenge von 2,44 MJ/kg (0,678 kWh/kg) Wasser benötigt (HARTMANN 2007, S. 58). Daher sinkt der Heizwert von Biomasse mit zunehmendem Wassergehalt.

Der Heizwert ist die maßgebliche Bestimmungsgröße für die Energiemenge eines Brennstoffes.

#### 2.1.2 Brennwert [ $H_o$ ] (früher „oberer“ Heizwert)

Der Brennwert bezeichnet die Wärmemenge die bei vollständiger Oxidation eines Brennstoffes freigesetzt wird unter Hinzurechnung der Kondensationswärme. Der Brennwert liegt daher etwas über dem Heizwert (bei Holz 7%, Rinde 6%) (KALTSCHMITT 2009, S. 350). Über spezielle technische Einrichtungen kann diese Energie genutzt werden.

#### 2.1.3 Trocknung / Lagerung

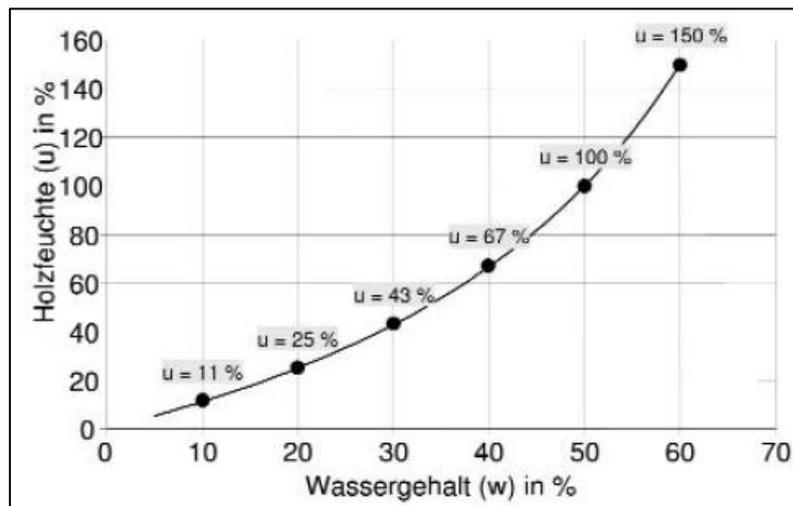
Die Trocknung ist ein thermodynamischer Prozess mit dem Ziel der Gutfeuchtereduzierung. Die Lagerung hingegen soll hauptsächlich den Erhalt der Guteigenschaften sichern sowie die Zeitspanne zwischen Brennstoffanfall und energetischer Verwertung überbrücken (KALTSCHMITT 2009, S. 285). Trocknung und Lagerung können sich ggf. überlagern.

#### 2.1.4 Wassergehalt / Feuchte

Die Begriffe Wassergehalt und Feuchte sind zu unterscheiden. Der Wassergehalt beschreibt den Quotienten aus Wassermasse und Gesamtmasse (feuchtes Holz). Hingegen wird die Holzfeuchte als Quotient aus Wassermasse und Trockenmasse angegeben. In der Holzbe- und verarbeitenden Industrie wird häufiger die Feuchte, beim Energieholz häufiger der Wassergehalt angegeben (WITTKOPF 2005, S. 18).

<b>Wassergehalt:</b>	Verhältnis aus Wassermasse und frischer Holzmasse <b>NASSBASIS</b>	=	Wassergehalt von 50%
<b>Holzfeuchte:</b>	Verhältnis aus Wassermasse und Trockenmasse <b>TROCKENBASIS</b>		Holzfeuchte von 100%

Bei 88% Wassergehalt ist der Heizwert von Holz gleich 0.



**Abbildung 2:** Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Wassergehalt (SCHARDT, 2006)

Umrechnung Wassergehalt aus Holzfeuchte

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

Umrechnung Holzfeuchte aus Wassergehalt

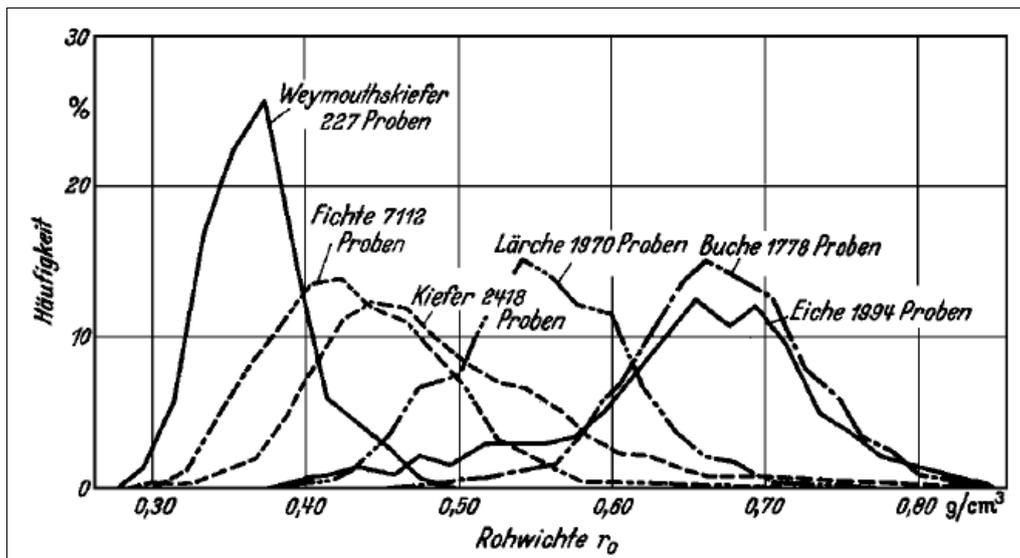
$$u = \frac{w}{100 - w} * 100$$

Frisch geschlagenes Holz fällt mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 45 % (Buche) bis 55 % (Fichte) an (KALTSCHMITT, 2009, S. 320). Qualitativ hochwertige Energieholzsortimente weisen einen Wassergehalt von < 20% auf (Hahn und Schardt 2007, S. 4).

Der Wassergehalt divergiert mit der Lage im Stamm bzw. am Baum (Astholz, Stammholz).

**2.1.5 Holzdichte**

Bei Holz (-brennstoffen) sind unterschiedliche Dichtebegriffe klar zu unterscheiden. Für Energieberechnungen ist neben dem Wassergehalt auch die Brennstoffdichte wesentlich (WITTKOPF 2004, S. 18). Im Allgemeinen hat Holz als Naturprodukt standort- und baumartenabhängig unterschiedliche Dichten. Die Dichten von Holz können jedoch auch intraspezifisch erheblich schwanken (ebd. 2004, S. 18). Verantwortlich hierfür sind hauptsächlich Genetik, Standort, Lage am Stamm sowie das Alter.



**Abbildung 3:** Holzdichten nach WITTKOPF (KOLLMANN, 1982)

Bei geschütteten Brennstoffen wie Sägenebenprodukten kann es während des Transportes zu Verdichtungen kommen. Dies ist problematisch bei z.B. Energiekalkulationen oder Abrechnungen von Brennstofflieferungen. Bei Hackschnitzeltransporten mit Wechselcontainer ist eine Volumenabnahme infolge des „Einrüttelns“ (Verringerung der Holzräume zwischen den Teilchen) von bis zu 10% möglich (ebd., S. 20).

### 2.1.6 Rohdichte

Die Rohdichte ist das Verhältnis von Masse zu Volumen des Holzes. Dieser Wert ist abhängig von der im Holz enthaltenen Feuchte. Er beschreibt die eigentliche Materialdichte, d.h. die Hohlräume zwischen den Teilchen (z.B. bei Hackschnitzel) werden nicht berücksichtigt. Die Rohdichte beeinflusst die Schüttdichte.

Die mechanische Trocknung (Pressung), insbesondere von Hackschnitzel, könnte eine Veränderung der Rohdichte zur Folge haben. Der Energiegehalt je Volumeneinheit würde dann neben der Wassergehaltsreduktion auch durch die Verdichtung des Brennstoffes steigen.

$$\text{Rohdichte [g/cm}^3\text{]} = \frac{\text{Masse (im feuchten Zustand)}}{\text{Volumen (im feuchten Zustand)}}$$

### 2.1.7 Darrdichte

Die Darrdichte ist eine Bezeichnung der Rohdichte in absolut trockenem (atro) Zustand.

$$\text{Darrdichte [g/cm}^3\text{]} = \frac{\text{Masse (atro)}}{\text{Volumen (atro)}}$$

### 2.1.8 Raumdichte

Die Raumdichte stellt die trockene Holzsubstanz aus dem Volumen des gequollenen (wassergesättigten) des Holzes dar.

$$\text{Raumdichte [g/cm}^3\text{]} = \frac{\text{Masse (atro)}}{\text{Volumen (V}_{\text{max}}\text{)}}$$

**Tabelle 2:** Raumdichten unterschiedlicher Autoren (WITTKOPF, 2005, S. 23)

Quelle\Baumart	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Pappel
DIETZ (1975)	403	419	581	577	347
WAGENFÜHR (1996)	379	431	558	571	371
SCHULZ (1966)	377	431	554	561	377
KOLLMANN (1982)	379	431	558	571	353

### 2.1.9 Schüttdichte

Als Schüttdichte wird das Verhältnis von Masse zu Volumen ( $\text{kg/m}^3$ ) – in Abhängigkeit des Wassergehaltes – der geschütteten Holzsubstanz (unter Hinzurechnung der Hohlräume zwischen den Teilchen) angegeben (KALTSCHMITT, 2009, S. 368).

**Tabelle 3:** Holzdichten in Abhängigkeit vom Wassergehalt (KALTSCHMITT, 2009, S. 353)

Wassergehalt in %	Buche			Fichte			Kiefer		
	Fest 1 Fm	SH 1 Rm	HS 1 m <sup>3</sup>	Fest 1 Fm	SH 1 Rm	HS 1 m <sup>3</sup>	Fest 1 Fm	SH 1 Rm	HS 1 m <sup>3</sup>
	Raumgewicht <sup>a</sup> in kg								
0	680	422	280	430	277	177	490	316	202
10	704	437	290	457	295	188	514	332	212
15	716	445	295	472	304	194	527	340	217
20	730	453	300	488	315	201	541	349	223
30	798	495	328	541	349	223	615	397	253
40	930	578	383	631	407	260	718	463	295
50	1 117	694	459	758	489	312	861	556	354

<sup>a</sup> mit Berücksichtigung der Tatsache, dass Holz bei der Trocknung maximal um das Schwindmaß schrumpft; die hier gewählten trockenen Holzdichten (Festmetermasse bei einem Wassergehalt von 0 %) ergeben sich aus den Rohdichten nach Tabelle 9.14; die jeweilige Holzdichte (mit Wasser) wurde korrigiert um das Schwindmaß (Buche 17,9 %, Fichte 11,9 %, Kiefer 12,1 %), wobei zwischen Darrdichte und dem jeweiligen Fasersättigungspunkt (Wassergehalt 25/25/21 % bei Buche, Fichte, Kiefer, nach /9-115/) eine lineare Volumenänderung angenommen wurde

## 2.2 Grundlagen der Holz Trocknung

Für die Entwicklung eines erfolgreichen Trocknungsverfahrens ist die Kenntnis der für die Trocknung maßgeblichen Faktoren unabdingbar. Es genügt dabei nicht einzelne Faktoren isoliert zu untersuchen. Der Trocknungsfortschritt sowie die Effizienz und Wirtschaftlichkeit

der Trocknungsverfahren wird von unterschiedlich zu gewichtenden Faktoren beeinflusst und bestimmt. Diese Faktoren sind u.a.:

- Wassergehalt, Schüttdichte, Fraktionsgröße des Brennstoffes
- Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Art des Trocknungsverfahrens

Der erzielbare Endfeuchtegehalt eines Trocknungsverfahrens ist allgemein von der relativen Luftfeuchtigkeit sowie von der Trocknungstemperatur abhängig.

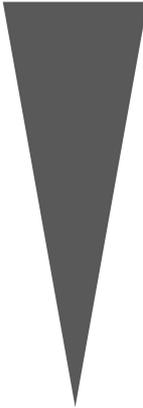
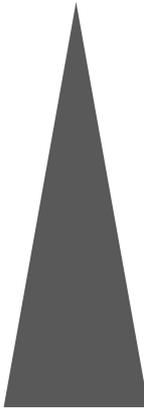
### 2.2.1 Bindung des Wassers im Holzkörper

Wasser ist im Holzkörper unterschiedlich stark gebunden. Mit sinkendem Wassergehalt im Holzkörper nehmen sowohl die Bindungskräfte des Wassers als auch der Trocknungsaufwand (-energie) zu. Diese Bindungskräfte müssen durch die Trocknung überwunden werden (KALTSCHMITT, 2009, S. 315).

Je nach Bindungsart bewegt sich Wasser während der Trocknung unterschiedlich im Holz. Freies Wasser (oberhalb des Fasersättigungspunktes) bewegt sich vorwiegend durch die Verdunstung entstehende Sogwirkung an die Oberfläche (Kapillarbewegung). Unterhalb des Fasersättigungspunktes findet der Bewegungsvorgang durch Teilchendruckunterschiede statt (Diffusion).

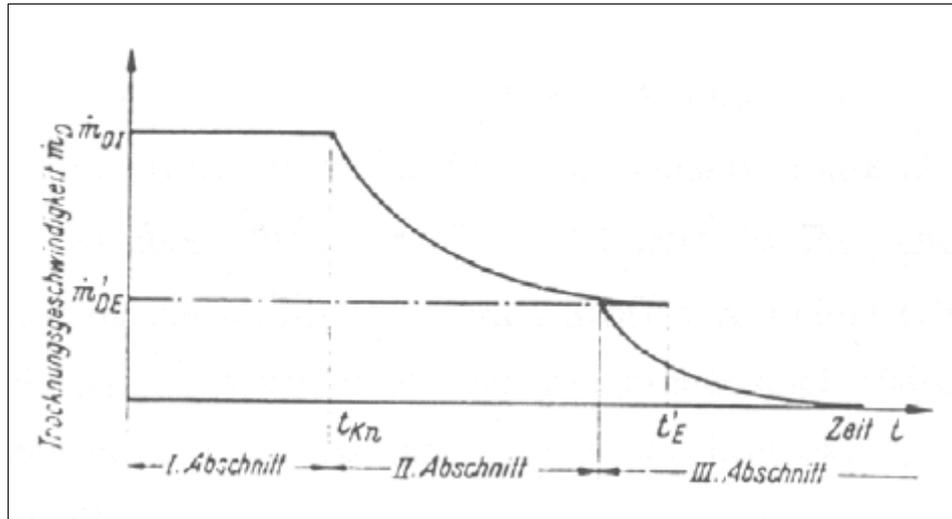
Die folgende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Bindungskräfte der Wassermasse im Holzkörper:

**Tabelle 4:** Art der Wasserbindung im Holz (KALTSCHMITT, 2009, S. 315)

Bindung	Wassergehalt [%]	Merkmale	Trocknungsgeschwindigkeit	Bindungsintensität
Kapillarsorption und Adhäsion	>25	Freies, ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen, gebundenes Wasser in den Holzfasern		
Fasersättigungspunkt	19 – 25	Holzschwind bei weiterem Wasserentzug, in Zellwänden gebundenes Wasser		
Kapillarsorption	13 – 25	Wasser kolloidal <sup>1</sup> gebunden, Trocknung durch Diffusion und Kapillarkräfte		
Elektrosorption	5,7 – 13	Wasser an der Micelle durch elektrische Kräfte gebunden		
Chemosorption	0 – 5,7	Molekulare Anziehungskräfte		

<sup>1</sup> Tröpfchen die in einem anderen Medium (auch Feststoffe wie Holz) fein verteilt sind.

Die Trocknungsgeschwindigkeit von Holz unter konstanten Bedingungen ist daher diskontinuierlich. Abbildung 4 zeigt den Trocknungsverlauf in 3 Abschnitten. In Abschnitt 1 trocknet das Holz bis zum Fasersättigungspunkt (frei vorliegendes Wasser entweicht) relativ konstant und zügig. Abschnitt 2 zeigt die Unterschreitung des Fasersättigungspunktes (kein freies Wasser mehr vorhanden), in dem das kapillar gebundene Wasser entzogen wird. Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt aufgrund der höheren Bindungsstärke des Wassers ab. Der Trocknungsaufwand muss deutlich erhöht werden. Meist sind dafür technische Verfahren erforderlich. Elektrische und molekulare Bindungskräfte lassen den Trocknungsfortschritt in Abschnitt 3 weiter verlangsamen.



**Abbildung 4:** Trocknungsgeschwindigkeit hygroskopischer Stoffe (GOLSER et.al., 2005, S. 16)

## 2.2.2 Trocknungspotenzial der Luft

Die Fähigkeit der Luft zur Trocknung von Stoffen hängt vorwiegend von der Temperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit (Wasserdampfgehalt) ab (GOLSER et al., 2005, S. 17). Beide Größen beeinflussen das Sättigungsdefizit der Luft. Das Sättigungsdefizit bestimmt die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft.

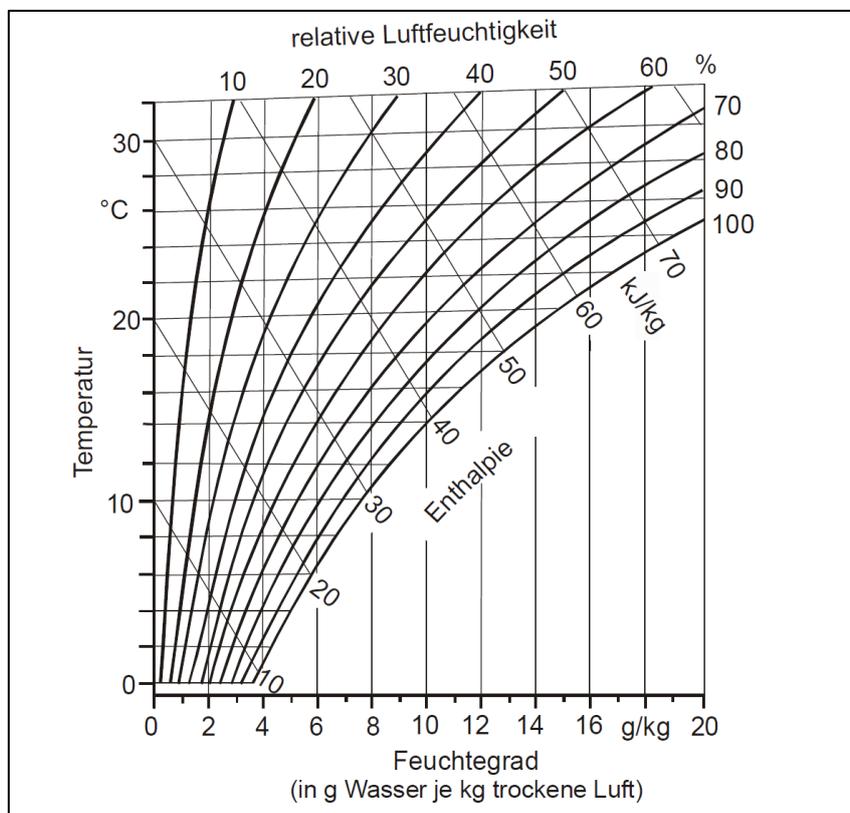
1 m<sup>3</sup> Luft bei 0°C kann maximal 4,8 g Wasser aufnehmen (ebd. 2005, S. 17). Mit steigender Temperatur steigt die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft. Erwärmt man die Luft um 20°C kann sie bis zu 17,3 g Wasser je m<sup>3</sup> Luft aufnehmen. Mit Erwärmung der Trocknungsluft sinkt somit ihre relative Luftfeuchtigkeit und steigt ihre Fähigkeit zur Wasseraufnahme. Die relative Luftfeuchtigkeit gibt an, wie viel Prozent des Maximalgehaltes an Wasserdampf bei gegebener Temperatur in der Luft enthalten ist.

Folglich kann bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 100 % bei unveränderter Temperatur kein Wasser mehr aufgenommen werden. Sinkt die Temperatur bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 100% so kondensiert der Wasserdampf. Steigt die Temperatur an, sinkt die rel. Luftfeuchtigkeit unter 100%. Es herrscht ein sogenanntes Sättigungsdefizit der Luft, d.h. es können weitere Mengen Wasserdampf zu Trocknungszwecken aufgenommen werden. Das Sättigungsdefizit der Luft ist somit die Differenz zwischen maximalem und aktuellem Wasserdampfgehalt.

Das H,x Diagramm nach Mollier (vgl. Abbildung 5). bildet eine wichtige Grundlage zur Planung von Trocknungsanlagen. Anhand der Abhängigkeiten von Wassergehalt, Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Enthalpie (Energiegehalt) der Luft kann die maximal erreichbare Wasseraufnahme der Trocknungsluft bestimmt werden (KALTSCHMITT 2009, S. 316). Daraus kann die notwendige Luftmenge und die erforderliche Gebläseleistung abgeleitet werden. Weiterhin kann anhand vergleichender Messungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Trocknungsluft der Trocknungserfolg bestimmt werden.

**Tabelle 5:** Beispiel nach WEINGARTMANN, 1991 zur Verdeutlichung

	Temperatur	Relative Luftfeuchtigkeit	Absolute Luftfeuchtigkeit
Einströmende Luft	20°C	35%	5 g/kg/cbm
Ausströmende Luft	16°C	62%	7 g/kg/cbm
Aufgenommene Wasserdampfmenge			2 g/kg/cbm



**Abbildung 5:** H,x Diagramm nach Mollier (KALTSCHMITT, 2009, S. 317)

Durch die Verdunstung von Wasser aus dem Trocknungsgut wird der Luft eine Wärmemenge von 2,44 MJ (ca. 0,7 kWh/kg Wasser) entzogen und kühlt somit ab (KALTSCHMITT 2009, S. 317).

Die mögliche maximale Trocknungsleistung einer Anlage (in kg Wasser/h) kann aus dem Trocknungspotenzial der Luft (in Wasser/m<sup>3</sup> Luft) multipliziert mit dem Volumenstrom der Trocknungsluft (m<sup>3</sup>/h) errechnet werden.

$$\text{Trocknungsleistung (kg Wasser/h)} = \text{Trocknungspotenzial der Luft (Wasser/m}^3 \text{ Luft)} \times \text{Volumenstrom der Luft (m}^3 \text{/h)}$$

Soll die Abschätzung der Mindest-Trocknungsdauer ermittelt werden, wird die insgesamt abzutrocknende Wassermasse des Trocknungsgutes benötigt.

$$\text{Abzutrocknende Wassermasse} = \frac{\text{Frischmasse} \times (\text{Ausgangswassergehalt} - \text{Endwassergehalt})}{100 - \text{Endwassergehalt}}$$

$$\text{Mindesttrocknungsdauer} = \frac{\text{Trocknerleistung} \times \text{abzutrocknende Wassermasse}}{\text{Trocknerleistung}}$$

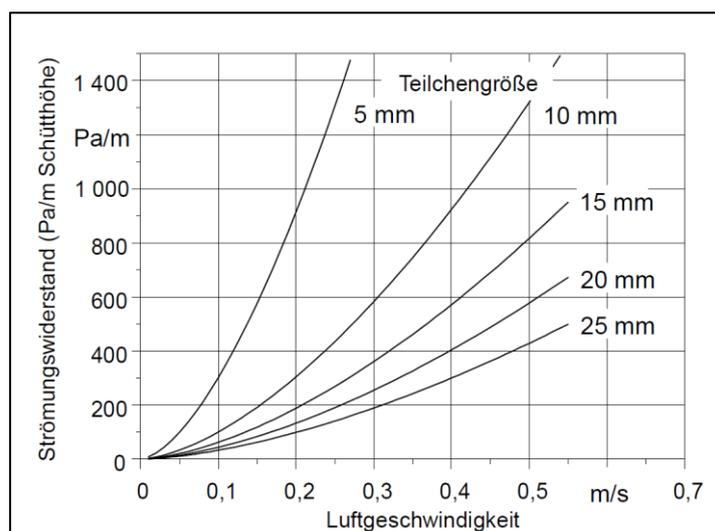
Die Berechnungen stellen lediglich Orientierungswerte dar (KALTSCHMITT, 2009, S. 317).

### 2.3 Strömungswiderstand

Der Trocknungsfortschritt ist neben der Wasseraufnahmefähigkeit der Luft auch vom Strömungswiderstand des Trockengutes abhängig. Der Strömungswiderstand ist abhängig von der Durchströmungslänge (Schichthöhe), der gewünschten Strömungsgeschwindigkeit sowie der Schüttgutart (Holzart, Wassergehalt, Fraktionsgröße, Schüttdichte, Oberflächenbeschaffenheit) (GOLSER et al., 2005, S. 19 ff.). Grobes Hackgut bietet einen geringeren Widerstand als feines. Bei höherer Strömungsgeschwindigkeit und geringerem Widerstand, lässt sich mehr Wasserdampf aus dem Trocknungsgut abtransportieren.

Je nach Trocknungsverfahren ist der Strömungswiderstand für die Auswahl und Auslegung des benötigten Gebläses entscheidend.

Bei SNP ist die Fraktionsgröße der entscheidende Faktor. Abbildung 6 zeigt den Strömungswiderstand verschiedener Hackgutfraktionen:



**Abbildung 6:** Spezifischer Strömungswiderstand verschiedener Hackgutfraktionen von 5 - 25 mm (WEINGARTMANN, 1991)

## 2.4 Belüftungsmenge

Die Belüftungsmenge sowie die Luftführung beeinflusst den Trocknungsprozess erheblich. Thermische Trocknungsverfahren haben die Aufgabe möglichst effizient die Trocknungsluft an das Gut zu transportieren, welche die Feuchtigkeit daraus verdunstet und abtransportiert. Bei technischen Trocknungsverfahren ist die Belüftungsmenge zumeist steuerbar. Bei natürlichen Trocknungsverfahren kann sie nur indirekt beeinflusst werden, bei der Haufentrocknung etwa durch die Wahl zugiger Trocknungsstandorte oder durch bauliche Maßnahmen (Lagerung des Trocknungsgutes auf Gitterböden, Harpfen, etc.). Die Belüftungsmenge hängt von folgenden Faktoren ab (GOLSER, 2005, S. 21):

- Gewünschte Trocknungszeit oder Trocknungsleistung (z.B. Srm/h, Wasserverdampfung in kg/h)
- Belüftungsintensität
- Trocknungsmenge
- Strömungswiderstand

## 2.5 Trocknungstemperatur

In einer wasserdampfgesättigten Umgebung treten pyrogene Stoffe bei der Trocknung von Hackschnitzeln schon ab einer Temperatur von 50 – 60°C aus (SCHULZ, 2007, S. 46). Damit verringert sich der Energiegehalt des Trocknungsgutes. Rein aus dieser Hinsicht wäre eine Trocknung unter diesen Temperaturbereichen sinnvoll. Welches die optimale Trocknungstemperatur tatsächlich ist, ist noch nicht abschließend geklärt (SCHULZ, 2007, S. 46).

## 2.6 Gründe für die Holztrocknung

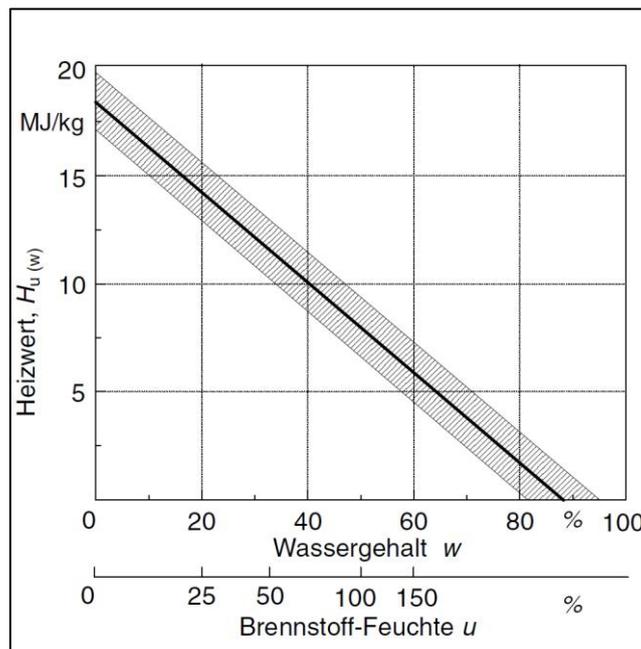
Die Trocknung von SNP - insbesondere von Hackgut - bringt nicht nur weitgehende Vorteile mit sich (Heizwertsteigerung, Gewichtsminderung, Lagerfähigkeit, etc.) sondern ist auch für wichtige spätere Anwendungszwecke (z.B. Feuerungssysteme) absolut zwingend (HARTMANN, 2007, S. 49). Kleinere Heizanlagen (15 – 200 kW) sind auf einen qualitativ hochwertigen Hackschnitzel angewiesen. So können diese Anlagen nur mit trockenem und feinem Hackgut betrieben werden (entsprechend ÖNORM (G30, W30 z.T. auch G50, W35)).

Neben der Stückigkeit ist der limitierende Qualitätsfaktor vorwiegend der Wassergehalt.

## 2.6.1 Steigerung des Heizwertes

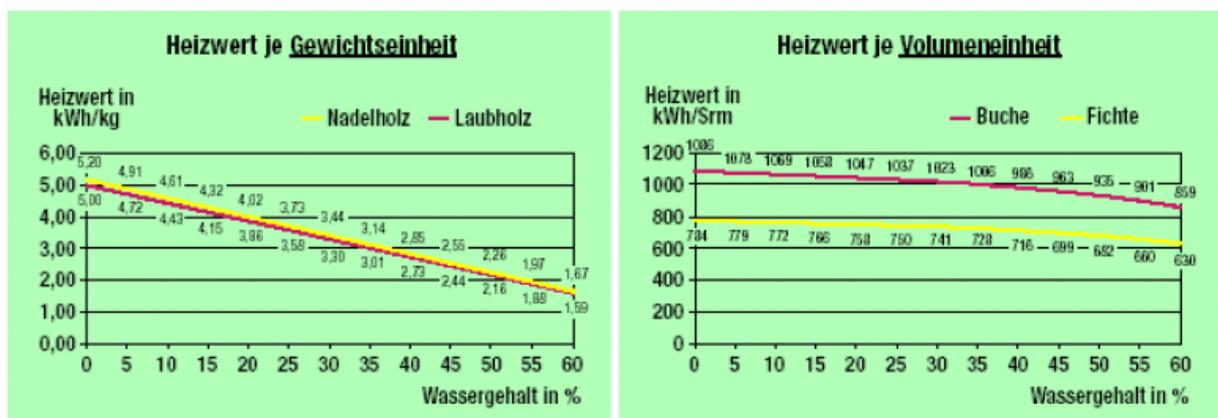
Die Trocknung von Energieholz hat eine Steigerung des Heizwertes zur Folge, da für die Verdunstung des im Brennstoff enthaltenen Wassers weniger Energie aufgewendet werden muss. Die Verdunstung des Wassers während des Oxidationsvorganges (Verbrennung) benötigt eine Wärmemenge von 2,44 MJ/kg (0,678 kWh/kg) (HARTMANN, 2007, S. 58). Daher sinkt der Heizwert mit zunehmendem Wassergehalt.

Der Energiegehalt von Holz ist vorwiegend vom Wassergehalt, aber auch von der Baumart abhängig. Beispielsweise kann der Heizwert je Gewichtseinheit von frischem Nadelholz (ca. 2 kWh/kg) durch eine Trocknung auf 20% Wassergehalt verdoppelt (ca. 4 kWh/kg) werden.



**Abbildung 7:** Zusammenhang von Wassergehalt und Heizwert je Gewichtseinheit (HARTMANN, 2007, S. 58)

Im Gegensatz zum Heizwert je Gewichtseinheit (siehe oben) steigt der Heizwert je Volumeneinheit deutlich weniger.



**Abbildung 8:** Heizwert je Gewichtseinheit im Vgl. zur Volumeneinheit (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 2011)

Hier werden auch die Dichteunterschiede der einzelnen Baumarten deutlich. Aufgrund der höheren Dichte hat die Buche (558 kg TM/m<sup>3</sup>) bei einem Wassergehalt von 20% einen Heizwert von 1078 kWh/Srm, die Fichte (379 kg TM/m<sup>3</sup>) 763 kWh/Srm. Die folgende Abbildung soll dies veranschaulichen:

**Tabelle 6:** Darrdichte und Heizwert bei Bu/Fi (HANSEN, 2010, S. 13)

	Buche	Fichte
<b>Darrdichte in TM/m<sup>3</sup></b>	558 kg	379 kg
<b>Heizwert bei 20% WG</b>	1078 kWh/Srm	763 kWh/Srm

So hat beispielsweise eine Trocknung von Fichtenhackschnitzel von 50% Wassergehalt (685 kWh/Srm) auf 20% (763 kWh/Srm) sowie eine Heizwertsteigerung von 78 kWh (11%) zur Folge hatte. Ähnlich verhält es sich bei Buche (12%).

In Abhängigkeit vom Wassergehalt haben die unterschiedlichen Holzarten je Gewichtseinheit etwa den gleichen Heizwert (bei WG 0%: Fichte und Kiefer 5,2 kWh/kg; Buche, Eiche und Pappel 5,0 kWh/kg). Auf die Gewichtseinheit bezogen hat Nadelholz einen etwas höheren Heizwert als Laubholz. Auf das Volumenmaß bezogen gibt es (bei gleichem Wassergehalt) größere Unterschiede der einzelnen Holzarten bezüglich ihres Heizwertes.

**Tabelle 7:** Heizwert je kg bzw. Srm bei Bu/Fi (HANSEN, 2010, S. 13)

Wassergehalt 20%	Buche	Fichte
<b>Heizwert/kg</b>	3,86 kWh	4,02 kWh
<b>Heizwert/Srm</b>	1078 kWh	763 kWh

## 2.6.2 Lagerfähigkeit

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Holz Trocknung ist die Herstellung der Lagerfähigkeit des Hackgutes. Lediglich bei feuchten Schüttgütern können folgende Lagerungsrisiken vermehrt auftreten (HARTMANN, 2009, S. 37):

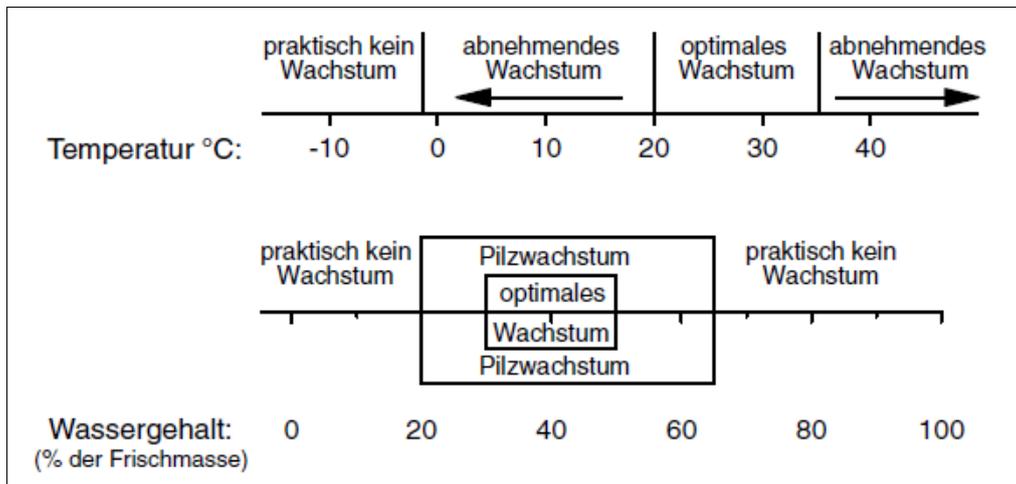
- **Substanzverlust durch biologische Abbauprozesse**
- **Selbstentzündung durch starke Erwärmung ausgelöst durch biologische und chemische Prozesse**



**Abbildung 9:** Beginnender Schmelbrand im Außenlager, Glutherd (CARMEN; TECHNOLOGIE UND FÖRDERZENTRUM; Merkblatt 01/07)

- **Pilzwachstum und Sporenbildung**
- **Geruchsbelästigung**
- **Wiederbefeuchtung**

Bei Wassergehalten von unter 20 – 30 % findet die biologische Aktivität nur noch erschwert bzw. noch in geringem Maße statt. Optimale Bedingungen für Pilzwachstum herrschen bei Wassergehalten von 30 – 50 % (KALTSCHMITT, 2009, S. 288). Hackgut mit einem Wassergehalt von unter 30% gilt nach der EN 14961 als „lagerfähig“.



**Abbildung 10:** Temperatur- und Wassergehaltsansprüche holzabbauender Pilze (KALTSCHMITT, 2009, S. 288)

**Tabelle 8:** Wassergehaltsklassen und ihre Beschreibung bei Hackgut (HANSEN, 2007, S. 9)

ÖNORM M7133		EN 14961-1:2010	
Klasse	Klassengrenzen	Klasse	Beschreibung
W20	< 20%	M10, M15, M20	trocken
W30	20 - 30%	M25, M30	lagerfähig
W35, W40	30 - 40%	M35, M40	begrenzt lagerfähig
W50	40 - 50%	M45, M50	feucht
		M55	feucht
		M55+	erntefrisch

### 2.6.3 Schüttdichte / Gewichtsminderung / Lagervorhaltung

Durch die Trocknung der Hackschnitzel gewinnen diese je Volumeneinheit an Heizwert und verlieren an Gewicht. Der Raumbedarf für die Einlagerung einer bestimmten Energiemenge nimmt daher ab. Zudem kann je m<sup>3</sup> Lagerraum mehr Energie eingelagert werden, was die Vorratsdauer verlängert. Der Transport wird durch höhere Ladungsmengen umweltfreundli-

cher und wirtschaftlicher. Die Transportemissionen je Energieeinheit nehmen ab. Trockenes Hackgut lässt sich überdies – ähnlich wie Pellets – in den Lagerraum einblasen. Bei feuchtem Hackgut kann es zur Tauwasserbildung in Lagerräumen kommen, was zur Pilzsporenbildung sowie zum Trockensubstanzabbau führt.

#### **2.6.4 Verbesserung der feuerungstechnischen Eigenschaften**

Durch den Einsatz zu feuchter Hackschnitzel in kleineren Feuerungen (bis zu 200 kW) können die für eine vollständige Verbrennung erforderlichen Kesseltemperaturen oft nicht erreicht werden. Dies führt zu erhöhten Emissionen, niedrigerer Effizienz und Kesselwirkungsgraden sowie zu erhöhter Korrosion bei Taupunktunterschreitung in Wärmetauschern und Abgasanlagen. Weiterhin ist das Teillastverhalten der Anlagen erheblich eingeschränkt bzw. die Nennleistung kann nicht mehr erreicht werden. Im Gegenteil dazu bringen trockene Hackschnitzel folgende Vorteile (HANSEN, 2007, S. 17):

- **Hohe Kesselwirkungsgrade**
- **Gute Regelfähigkeit mit Anpassung an verschiedene Brennstoffe**
- **Optimaler Ausbrand der Holzgase**
- **Niedrigere Emissionen**
- **Bessere Wirtschaftlichkeit und schnellere Amortisation der Investition**
- **Eine niedrigere adiabate Feuerraumtemperatur in Heizanlagen**

## 2.7 Qualitätskriterien für Sägenebenprodukte

Für die energetische Nutzung sind vorwiegend folgende Kriterien bezüglich der Brennstoffqualität entscheidend (KALTSCHMITT, 2009, S. 334):

**Tabelle 9:** Kriterien für Brennstoffqualität

	<b>Merkmal</b>	<b>Auswirkung</b>
<b>Elementar-zusammensetzung</b>	C-, H-, O-Gehalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Heizwert</li> <li>▪ Brennwert</li> <li>▪ Luftbedarf</li> </ul>
	K-, Mg-, Ca-Gehalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ascheerweichungsverhalten</li> <li>▪ Schadstoffeinbindung</li> </ul>
<b>Brennstofftechnische Eigenschaften</b>	<b>Wassergehalt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Heizwert</li> <li>▪ Lagerfähigkeit</li> <li>▪ Gewicht, Schüttdichte</li> <li>▪ Verbrennungstemperatur</li> <li>▪ Brückenbildungsneigung</li> </ul>
	<b>Heizwert</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energiegehalt</li> <li>▪ Anlagenauslegung</li> </ul>
	Aschegehalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Staubemission</li> <li>▪ Rückstände</li> </ul>
	Ascheerweichungsverhalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schlackebildung</li> <li>▪ Betriebssicherheit</li> <li>▪ Wartungsbedarf</li> </ul>
<b>Physikalisch-mechanische Eigenschaften</b>	<b>Stückigkeit</b> Fraktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufbereitung</li> <li>▪ Zuordnung zu Feuerungsanlagen und Transportsystemen</li> <li>▪ Zündfähigkeit</li> <li>▪ Trocknungsvermögen</li> </ul>
	<b>Größenverteilung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Förderung</li> <li>▪ Trocknungseigenschaften</li> <li>▪ Explosionsgefahr</li> <li>▪ Staubentwicklung</li> </ul>
	<b>Schüttdichte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lageraufwand</li> <li>▪ Transportaufwand</li> <li>▪ Leistung der Fördererlemente</li> </ul>

Die fettgedruckten Qualitätsparameter werden mit hoher Wahrscheinlichkeit am stärksten durch das neue mechanische Trocknungsverfahren beeinflusst.

Die Auswirkungen des neuen Trocknungsverfahrens hinsichtlich dieser Qualitätsparameter sind daher zu überprüfen.

### 2.7.1 Elementarzusammensetzung

#### 2.7.1.1 Oxidierbare Elemente

Der Heizwert ist vorwiegend durch den Gehalt an oxidierbaren Elementen bestimmt. Diese sind primär Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H). Es gilt die Faustregel, dass die Energiemenge von 2,5 kg lufttrockenem Holz (ca. 10 kWh bzw. 36 MJ) etwa 1 l Heizöl entspricht (KALTSCHMITT, 2009, S. 351).

## 2.7.2 Brennstofftechnische Eigenschaften

Folgendes Kapitel, ist soweit nicht anders gekennzeichnet, folgender Literatur entnommen (KALTSCHMITT, 2009, S. 333 ff.).

### 2.7.3 Wassergehalt / Holzfeuchte

Maßgeblich wird der Heizwert durch den Wassergehalt / die Holzfeuchte als von der Holzart bestimmt. Es besteht ein linearer Zusammenhang dieser beiden Größen. Je höher der Wassergehalt / die Holzfeuchte desto niedriger der Heizwert. Wassergehalt und Holzfeuchte unterscheiden sich folgendermaßen:

<b>Wassergehalt:</b>	Verhältnis aus Wassermasse und frischer Holzmasse <b>TROCKENBASIS</b>	Wassergehalt von 50%
		=
<b>Holzfeuchte:</b>	Verhältnis aus Wassermasse und Trockenmasse <b>NASSBASIS</b>	Holzfeuchte von 100%

Weiterhin hat der Wassergehalt einen Einfluss auf

- **Volumen**
- **Masse**
- **Verbrennungstemperatur**
- **Lagerfähigkeit, etc.**

Vorwiegend wird durch den Wassergehalt die Masse sowie die Verbrennungstemperatur beeinflusst. Wassergehalte von mehr als 16% führen verstärkt zu biologischer Aktivität, die mit Energieverlusten einhergehen.

Der Wassergehalt waldfrischen Holzes liegt abhängig von Baumart, Alter und Jahreszeit zwischen 45 – 60%.

Das neue Trocknungsverfahren soll vorwiegend den Wassergehalt effektiv senken und damit den Heizwert sowie die Lagerfähigkeit erhöhen. Je nach Kombination der mechanischen und thermischen Trocknungsschritte, kann der Wassergehalt auf eine bestimmte, nachgefragte Menge eingestellt werden.

### 2.7.4 Aschegehalt

Beeinflusst wird der Heizwert auch vom Aschegehalt. Auch hier besteht ein nahezu linearer Zusammenhang. Je höher der Aschegehalt, desto niedriger fällt der Heizwert aus. Der Aschegehalt wird bei Holzbrennstoffen vorwiegend durch den Rinden- und Grünanteil, der Holzart sowie von Verunreinigungen des Brennstoffes beeinflusst. Der Aschegehalt hat Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen sowie auf die technische Auslegung einer Feuerungsanlage.

## 2.7.5 Ascheerweichungsverhalten

Während der Verbrennung kann es bei Asche zu physikalischen Veränderungen kommen. Je nach Temperaturniveau kann es dadurch zur Verklebung bis hin zur völligen Aufschmelzung der Aschepartikel kommen. Dadurch können sich erhebliche technische Nachteile in Konversionsanlagen (z.B. Heizkesseln), wie zum Beispiel Anbackungen und Ablagerungen in Feuerraum, Rost- und Wärmeüberträgerflächen, ergeben. Die Folge können Störungen, Betriebsunterbrechungen sowie Veränderungen der Verbrennungsluftzufuhr sein. Zudem steigt das Risiko von Hochtemperaturkorrosion. Je niedriger der Ascheerweichungspunkt eines Brennstoffes ist, desto eher kommt es zum Schmelzen der Asche. Holz und Rinde hat mit ca. 1300 und 1400 °C eine unkritische Erweichungstemperatur.

## 2.7.6 Flüchtige Bestandteile

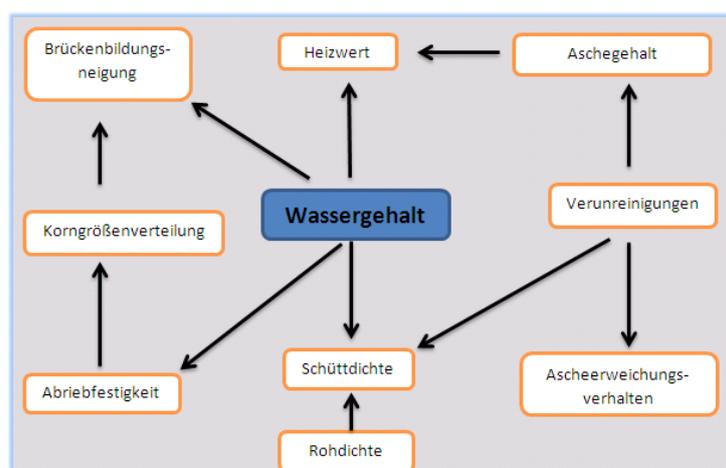
Bei der pyrolytischen Zersetzung von Biomasse wie SNP werden flüchtige Bestandteile in Form von Gas frei. Die Menge an flüchtigen Bestandteilen die unter Wärmeeinwirkung frei werden, charakterisiert die Eigenschaft eines Brennstoffes in brennbare Gase zu zerfallen. Diese Eigenschaft erlaubt Rückschlüsse auf die

- Flammenbildung (bei der Verbrennung) und auf die
- Gasbildung (bei der Vergasung).

Für die Feuerungskonstruktionen ist dies ein Brennstoffmerkmal von besonderer Bedeutung. Holzbrennstoffe verfügen über einen Anteil an flüchtigen Bestandteilen mit 80% der TM.

## 2.8 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

Diese Parameter von Holzbrennstoffen werden vorwiegend durch die Ernte- und Aufbereitungstechnik (daher auch von der Trocknungstechnik) bestimmt. Sie stehen in hohem Maße in Wechselwirkung zueinander. Zentral von Bedeutung ist der Wassergehalt. Er wirkt auf viele der übrigen Kenngrößen ein.



**Abbildung 11:** Abhängigkeiten wichtiger brennstofftechnischer Eigenschaften vom Wassergehalt (KALTSCHMITT, 2009)

### 2.8.1 Stückigkeit

Die Stückigkeit wird bei Hackschnitzeln durch die Abmessungen beschrieben. Diese sind normiert durch die ÖNORM M7133 oder die CEN/TS 14961.

### 2.8.2 Größenverteilung und Feinanteil / Fraktionsgrößenverteilung

Neben der Partikelform und –größe ist die Fraktionsgrößenverteilung eines Brennstoffes ein wichtiges Kriterium. Diese wird durch die Anteile der einzelnen Größenklassen bestimmt. Die Größenverteilung des Brennstoffes wirkt auf die Fließ-, Transport und Lagereigenschaft. Betroffen davon sind Entnahme-, Beschickungs- und Fördersysteme. Überlängen bei Hackschnitzeln können zu Störungen in Form von Blockaden oder Schäden an Förderaggregaten führen. Weiterhin werden die Fließfähigkeit sowie der Luftdurchtrittswiderstand durch die Größenverteilung bestimmt. Bestimmt wird die Größenverteilung durch Siebung.

Für Holzhackgut werden die Größenverteilungen (Feinanteil, Hauptfraktion, Grobanteil) für bestimmte Qualitäten durch Normen (ÖNORM M7133 oder CEN/TS 14961) definiert. Um bestimmte Qualitäten zu erreichen, müssen die Brennstoffchargen ggf. gesiebt werden.

### 2.8.3 Fließeigenschaften / Brückenbildungsneigung / Rieselfähigkeit

Die Fließeigenschaft (Transportverhalten auf Förderaggregaten) sowie die Brückenbildungsneigung (Bildung von Hohlräumen in Silos bei Brennstoffentnahme) nehmen mit steigendem Wassergehalt sowie der Stückigkeit (Überlängen, Verzweigungen) zu. Eine gleichmäßige Brennstoffbeschaffenheit (gleichmäßige Korngröße, glatte Oberflächen) verbessert die Rieselfähigkeit.

### 2.8.4 Schüttdichte

Das Lager- und Transportvolumen von SNP wird durch die Schüttdichte (bei stückigen Brennstoffen, wie z.B. Scheitholz, von der Stapeldichte) bestimmt.

$$\text{Schüttdichte} = \frac{\text{Masse Brennstoff (z.B. kg)}}{\text{Volumen Behälter (z.B. m}^3\text{)}}$$

Hackgut hat abhängig von Wassergehalt und Holzart eine Lagerdichte von etwa 150 - 450 kg/m<sup>3</sup>. Bei 15% Wassergehalt hat Weichholz eine Dichte von 200 kg/ m<sup>3</sup> sowie Hartholz von 280 kg/m<sup>3</sup>.

Bei Holzhackgut kann die Schüttdichte durch Erschütterung um etwa 11% zunehmen. Werden Hackschnitzel mit Wechselcontainer transportiert, kann nach WITTKOPF eine Volumenabnahme von bis zu 10% stattfinden (WITTKOPF, 2005, S. 21).

Der mechanische Trocknungsvorgang kann Auswirkungen auf die Lagerungsdichte zur Folge haben.

### 2.8.5 Rohdichte / Schwindmaß

Die Rohdichte beschreibt die tatsächliche Materialdichte des Brennstoffes (ohne Berücksichtigung der Hohlräume zwischen den Brennstoffteilchen). Beeinflusst wird von ihr die Schütt-

dichte von SNP. Zudem werden feuerungstechnische Eigenschaften (wie z.B. spezifische Wärmeleitfähigkeit) sowie Förderungs- und Beschickungseigenschaften beeinflusst.

Weichhölzer werden mit einer Rohdichte in absolut trockenem Holz (Darrdichte) von bis zu  $0,55 \text{ g/cm}^3$  beschrieben (Fichte, Tanne, Rotholz, Erle, Pappel, Weide, etc.). Harthölzer liegen über  $0,55 \text{ g/cm}^3$  (Eiche, Buche, Esche, etc.). Durch Aufsättigung mit Wasser bis zum Fasersättigungspunkt (19 – 25% Wassergehalt) erhöht sich das Volumen um das sogenannte Schwindmaß. Die Volumenvergrößerung beträgt bei

- Buche und Eiche ca. 18%
- Fichte und Kiefer ca. 12%

Durch den mechanischen Trocknungsvorgang, der durch Pressung der SNP erreicht wird, kann sich die Rohdichte des Brennstoffes verändern. Dadurch ergeben sich möglicherweise Änderungen in anderen Brennstoffparametern.

### **2.8.6 Abriebfestigkeit**

Durch die mechanische Beanspruchung der SNP während des Pressvorganges ist zu prüfen, ob dies zur Freisetzung von Feinmaterial oder Stäuben führen kann.

### **2.8.7 Energiedichte pro Srm / Umrechnung in Verkaufsmaß**

Bei der Energiedichte handelt es sich um die jeweilige **Masse** oder das jeweilige **Volumen je Energieeinheit**. Bei Holzbrennstoffen wird dieser Wert nach der Energiemenge unter einem gegebenen Wassergehalt angegeben.

## 2.9 Trocknungsverfahren

### 2.9.1 Übersicht der Trocknungsverfahren

Abbildung 12 stellt eine allgemeine Übersicht über die Verfahren der Hackgutrocknung dar.

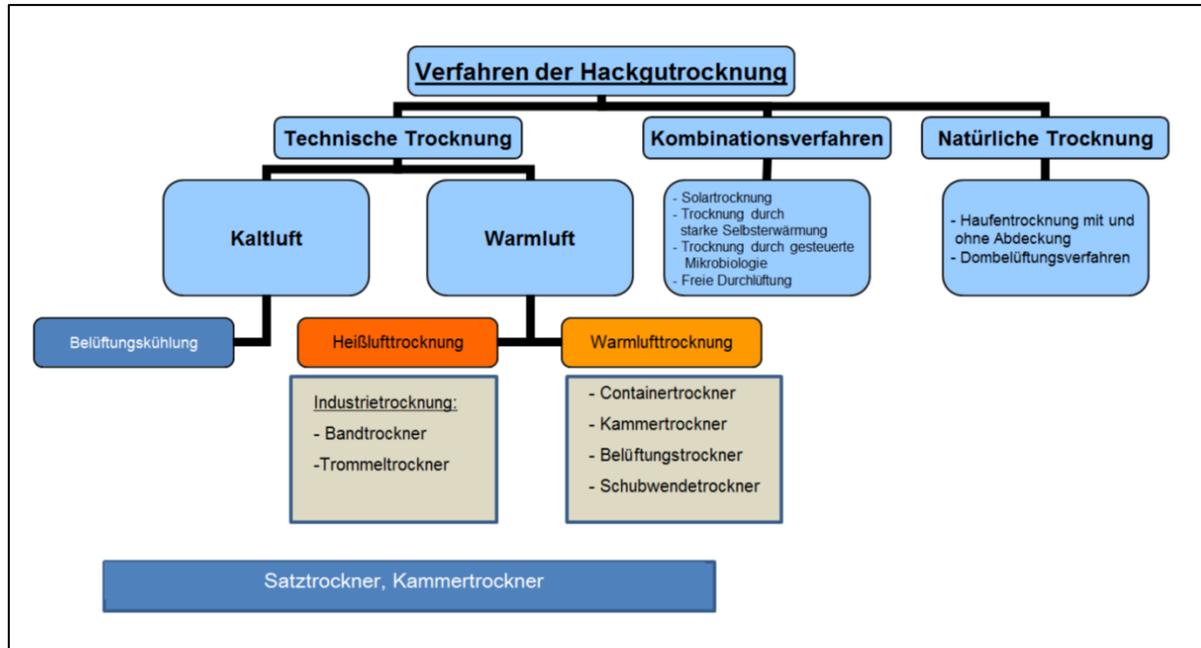


Abbildung 12: Übersicht Trocknungsverfahren

### 2.9.2 Natürliche Trocknung

Natürliche Trocknungsverfahren eignen sich ebenso wie technische Verfahren zur Wasser-gehaltsabsenkung in Rohstoffen wie SNP. Sie weisen jedoch einige schwerwiegende Nachteile auf:

- **Zeitaufwand:** Der Zeitaufwand für natürliche Trocknungsverfahren und damit die Trocknungsleistung/Strm ist für eine effiziente und wirtschaftliche Trocknung im laufenden Betriebsprozess der Sägeindustrie zu hoch. Eine Haufentrocknung von frischem zu lagerfähigem Material dauert etwa 4-6 Monate. Der erreichbare Wassergehalt ist selbst nach dieser Trocknungsdauer stark von den Witterungsbedingungen, vom Ausgangswassergehalt und von anderen Faktoren abhängig (SCHULZ 2007, S. 16).
- **Aufwand an Logistik, Infrastruktur, Kosten:** Auch die relativ lange Trocknungsdauer und der mitunter hohe Platzbedarf lässt die Trocknungskosten steigen. Das Material muss je nach Verfahren relativ aufwendig personal- und maschinenintensiv bearbeitet werden.
- **Trocknungsqualität:** Mit natürlichen Trocknungsmethoden lässt sich kaum ein gleichmäßiger Wassergehalt erzeugen. Dies ist jedoch eine Grundvoraussetzung für viele Verwendungszwecke von Qualitätshackschnitzel sowie v.a. für eine planbare Logistik eines homogenen Produktes.

- **Abhängigkeit von Witterung und Jahreszeit:** Je nach vorherrschendem Klima (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) ist Holz in der Lage Feuchtigkeit abzugeben bzw. aufzunehmen. Daher sind der Trocknungsfortschritt sowie die Einstellung des Wassergehaltes im Trocknungsgut vom Klima abhängig.
- **Trockenmasseverlust/Pilzwachstum und Sporenbildung:** Durch natürliche Trocknungsmethoden mit Anfangswassergehalten von >30% findet durch natürliche Umsetzungsprozesse durch Pilze und Bakterien ein Trockenmasseverlust statt. Dieser kann abhängig von Feinanteil, Grün- oder Rindenanteil, Anfangswassergehalt, etc. bis über 25% betragen (KALTSCHMITT 2009, S. 290). Die damit einhergehende Sporenbildung kann gesundheitsschädlich für den Menschen sein. Durchschnittlich werden je nach Materialbeschaffenheit zwischen 0,5 – 4,0 %/Monat der Trockenmasse abgebaut (VON WEBENAU 1999, S. 36).

**Tabelle 10:** Jährlicher TM-Verlust/Jahr bei der Holzlagerung im Freien (HARTMANN, 2007, S. 38)

Material / Lagerart	Verlust (% TM/a)
feines Waldhackgut, frisch, unabgedeckt	20 bis >35
feines Waldhackgut, getrocknet, abgedeckt	2 bis 4
grobstückiges Waldhackgut (7 bis 15 cm), frisch, abgedeckt	ca. 4
Rinde, frisch, unabgedeckt	15 bis 22
Holzstangen (Fichte, Kiefer), frisch, unabgedeckt	1 bis 3
junge Ganzbäume (Pappel, Weiden) frisch, unabgedeckt	6 bis 15

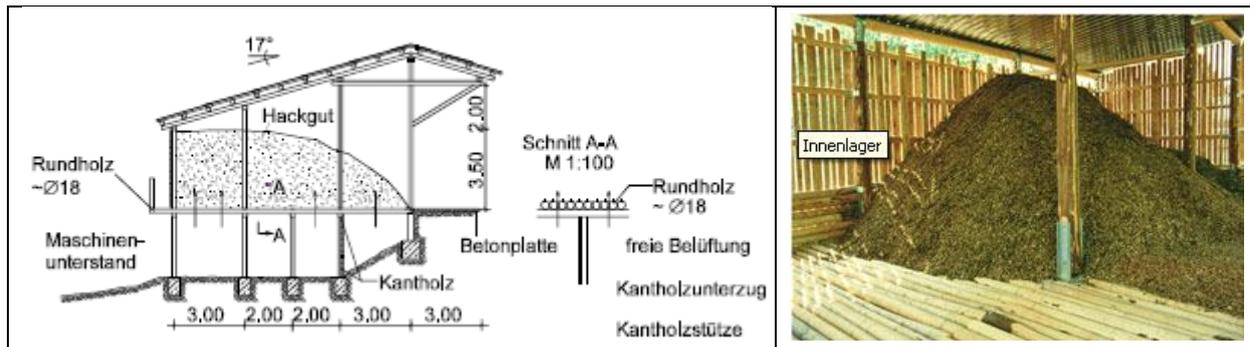
#### 2.9.2.1 Bodentrocknung

Das Trocknungsgut wird auf dem Boden ausgebreitet und durch das Überstreichen der Trocknungsluft getrocknet. Bei guter Sonneneinwirkung und niedriger Schütthöhe kann schon nach einem Tag der Wassergehalt von 20% sinken (HARTMANN, et.al, 2007, S. 51).

Nachteilig sind bei diesem Verfahren der hohe Flächenbedarf sowie das nötige Wenden des Materials. Das macht das Verfahren wenig flexibel (Abhängigkeit von Jahreszeit und Wetterbedingungen) und nur in Ausnahmefällen geeignet um als Folgetrocknungsverfahren im Anschluss an die mechanische Trocknung Anwendung zu finden.

#### 2.9.2.2 Natürliche Konvektionstrocknung

Eine Trocknung von Hackgut durch natürliche Konvektion (überstreichende Luft nimmt die Feuchtigkeit vom Holzkörper auf) kann in speziellen Lagerbehältern erfolgen. Diese Lagerbehälter – auch Harpfen genannt – haben luftdurchlässige Seitenwände und fördern somit eine Durchlüftung des Materials. Auch in einem Gutstock (Hackschnitzelmiete) findet eine Konvektionstrocknung - verstärkt durch die natürliche Selbsterwärmung - statt (siehe nächstes Kapitel).



**Abbildung 13:** Lagerhalle mit durchlässigem Boden zur erleichterten Selbstdurchlüftung (HARTMANN 2007, S. 52 und WITTKOPF, 2009, S. 2)

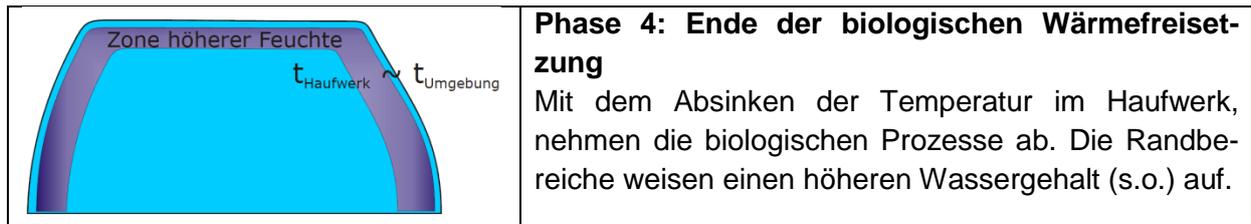
Harpfen werden möglichst freistehend sowie an windigen und sonnigen Plätzen aufgestellt. Die Zugluft sowie die Sonneneinstrahlung sollen die Trocknung unterstützen. Die Harpfeutrocknung kommt jedoch eher für Kleinverbraucher in Frage (KALTSCHMITT, 2009, S. 322).

### 2.9.2.3 Trocknung durch Selbsterwärmung

Bei Schüttgütern wird die natürliche Konvektion durch die Selbsterwärmung, ausgelöst durch den Abbau organischer Substanz im Gutstock, unterstützt. Die Erwärmung führt zu einem aufwärts gerichteten Luftstrom der frische Trocknungsluft nachströmen lässt. Mit der Abnahme des Wassergehaltes im Gutstock, lässt auch der Trocknungsverlauf durch Abnahme der biologischen Aktivität nach. I.d.R. findet dieses Verfahren als Haufentrocknung statt.

#### Prozessbeschreibung Haufentrocknung:

<p><b>Hackguthaufwerk</b></p>	<p><b>Phase 1: Frisch aufgesetztes Haufwerk</b> Der Hackguthaufen wird frisch aufgesetzt.</p>
	<p><b>Phase 2: Einsetzen der Selbsterwärmung</b> Je nach Ausgangsmaterial (z.B. Grünanteil, Stückigkeit, Wassergehalt, Menge, Schütthöhe, Verunreinigungen, Brennstoffart, etc.) kann nach wenigen Tagen durch biologische Prozesse (Respiration lebender Zellen, Metabolismus von Pilzen und Bakterien) die Erwärmung des Haufwerkes einsetzen. Die Wärmerfreisetzung führt zu einem nach oben gerichteten Luftstrom. Feuchte Luft wird aus der Miete abtransportiert.</p>
	<p><b>Phase 3: Entstehung einer Kondensationsschicht</b> Durch Abkühlung und Kondensation der feuchten Luft in den Randbereichen entsteht die Kondensationsschicht. Dieses Milieu schafft gute Voraussetzungen für starken Pilzbefall. Die Folgen sind vermehrter Substanzabbau (Energieverlust), Geruchsbelästigung sowie ein Gesundheitsrisiko durch Sporenelation.</p>



**Abbildung 14:** Trocknung durch Selbsterwärmung im Haufwerk (nach BRUMMACK, 2008)

Um in einem laufenden Betriebsprozess größere Mengen an Hackschnitzeln durch Trocknung zu veredeln, ist dieses Verfahren nicht geeignet. Maßgebliche Faktoren wie die Trocknungsdauer und -qualität, der Substanzverlust, der Pilzbefall mit seinen negativen Auswirkungen (Geruchsbelästigung, Gesundheitsgefährdung), der Platzbedarf sowie die erhöhten Manipulationskosten lassen dieses Verfahren ausscheiden.



**Abbildung 15:** Verpilzte Kondensationszone bei Haufentrocknung (WITTKOPF, 2009, S. 2)

### 2.9.3 Kombinierte Trocknungsverfahren

#### 2.9.3.1 Trocknung durch gesteuerte Mikrobiologie

Bei diesem Verfahren soll durch Beimpfung des Trocknungsgutes eine günstige Mikroflora etabliert werden, um eine Verpilzung des Materials zu verhindern. Der Prozess läuft in 3 Phasen ab. Innerhalb von rund 14 Tagen kann so der Wassergehalt von 50% auf unter 20% gesenkt werden (GOLSER 2005, S. 77 ff.).

**Startphase:** Das frische Hackgut wird in ein Trocknungssilo gefüllt und währenddessen mit dem Impfstoff behandelt. Die unerwünschte Verpilzung wird so durch die von dem Impfstoff eingebrachte Mikroflora vermieden.

**Aufschlussphase:** Anschließend erwärmt sich das Material innerhalb von 3-4 Tagen auf 50°C. Thermophile Bakterien bauen einen Teil der Zellbestandteile ab. Dieser Abbauprozess steigert die Porosität des Holzes, welches so durch den reduzierten Diffusionswiderstand das Abtrocknungsverhalten verbessert. Diese Phase dauert etwa 4-5 Tage.

**Abtrocknungsphase:** Innerhalb von weiteren 4-5 Tagen trocknet das Material auf einen Wassergehalt zwischen 15 -20% ab.

Bei einer Trocknung von 54% auf 15% Wassergehalt, kommt es nach GILLHOFER (1998) zu einem Masseverlust von 15%. Die Modellanlage zu diesem Versuch hatte Probleme mit erhöhter Pilzbelastung durch Weißfäuleerreger. Zudem kam es auch zur Ausbildung von Kondensationszonen mit vermehrter Verpilzung.

### 2.9.3.2 Solartrocknung

Bei dieser Methode wird die Trocknungsluft mittels Solarkollektoren unter dem Dach angewärmt und anschließend durch das Trocknungsgut geblasen. Bei einer Versuchsreihe konnte der Wassergehalt in 2 Monaten von 50% auf 20% verringert werden. JÜNNEMANN (2002) untersuchte eine solche Anlage mit einer Abtrocknungsleistung von 33-60 kg Wasser pro Stunde und einer Kapazität von 75 Tonnen. Die durchschnittliche Trocknungsdauer für diese Kapazität auf einen Wassergehalt unter 20% beträgt ca. 150 Tage. Zudem sei eine Rentabilität dieser Größenordnung (ca. 1000 Srm/a) nur bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren gegeben.

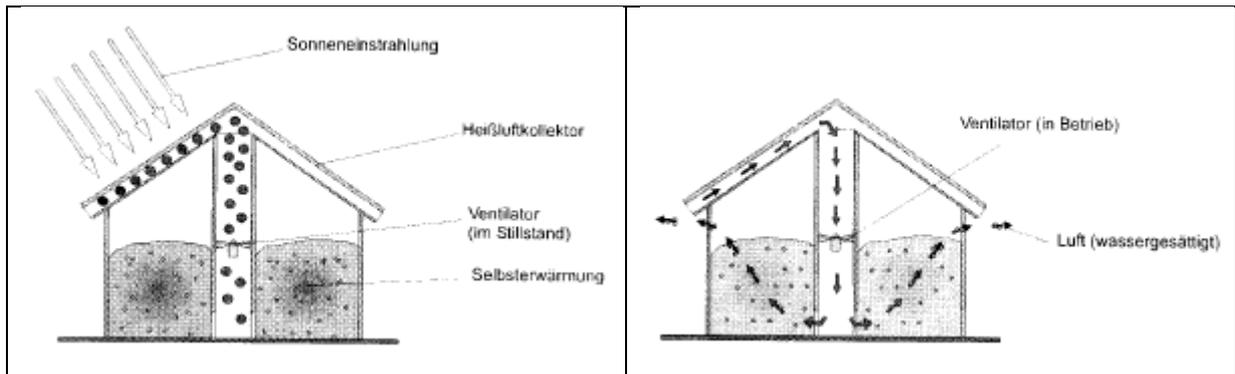


Abbildung 16: Solartrocknung (GOLSER 2005, S. 80)

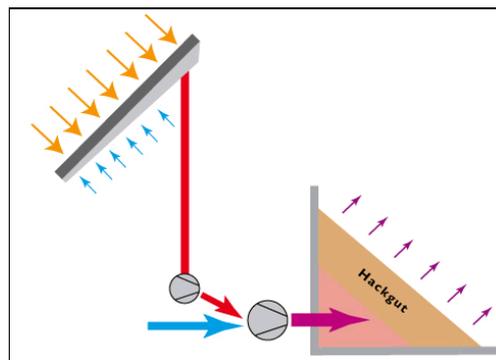


Abbildung 17: Solartrocknungssystem der Firma Cona ([www.solar.cona.at](http://www.solar.cona.at))



Abbildung 18: Cona Solartrocknungssystem ([www.cona.at](http://www.cona.at))

Das Cona Solartrocknungssystem stellt sich als solares Trocknungsverfahren beeindruckend dar. Im Projektkontext erweist es sich jedoch nicht als Alternative für ein mögliches Trocknungsverfahren. Die oft beengten Platzverhältnisse sowie die Investitionskosten werden für die Sägewerke hier zum limitierenden Faktor. Zudem kommen für die nötige Umschichtung des Materials zusätzliche Maschinen-, Personal- sowie Lagerkosten hinzu. Ferner ist die Trocknungsleistung für die zu trocknende Holzmasse mittelständischer Sägewerke zu gering.

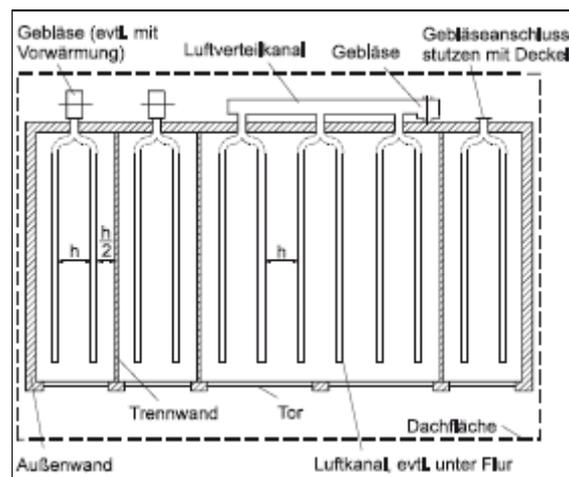
## 2.9.4 Technische Trockungsverfahren

Die technische Trocknung ist ein aktives Trockungsverfahren. Die technischen Verfahren zur Biomassetrocknung arbeiten durchweg nach dem Durchströmprinzip. Die Feuchtigkeit wird dabei von der durchströmenden Luft aus dem Trockengut aufgenommen (Konvektionstrocknung) (KALTSCHMITT 2009, S. 326). Es gibt Systeme mit oder ohne Gutförderung. Im Folgenden werden die wesentlichen Möglichkeiten beschrieben.

### 2.9.4.1 Belüftungskühlung

Die Trocknung wird durch eine zyklische Zwangsbelüftung mit kalter Außenluft erreicht. Durch das Trocknungsgut wird in Lagerhallen mittels eines zeitgeregeltem Gebläses in Intervallen Luft geblasen. Die biologische Selbsterwärmung im Gutstock bewirkt eine Erwärmung und somit eine Erhöhung der Wasseraufnahmefähigkeit der Luft. Die Feuchtigkeit aus dem Brennstoff verdunstet und erhöht die Luftfeuchtigkeit. Die angefeuchtete Luft im Brennstofflager wird durch das Gebläse mit frischer Außenluft ersetzt.

Durch natürliche Selbsterwärmungsprozesse im Brennstoff wird die Luft erwärmt und eine Erhöhung der Wasseraufnahmefähigkeit der Luft erreicht. Ab einer Temperaturdifferenz zur Außenluft von 5 – 10 K findet ein Belüftungszyklus statt. Die feuchte Trocknungsluft wird so abgeführt und ausgetauscht (KALTSCHMITT, 2009 S. 323).



**Abbildung 19:** Anordnung der Belüftungsschächte bei Satzrocknern (HARTMANN, 2007, S. 54)

Positiv sind der geringere Fremdennergieeinsatz durch die zyklische Belüftung und der schnellere Trocknungsfortschritt als bei kontinuierlicher Kaltbelüftung im Winter.

Negativ ist die vor allem in kalt-feuchter Jahreszeit die zyklische Abkühlung des Brennstoffes, was die Trocknungsgeschwindigkeit negativ beeinflusst. Ein Trockensubstanzverlust findet statt. Wie bei der natürlichen Trocknung verlangsamt sich der Trocknungsfortschritt durch die später schwächer werdende biologische Aktivität im Brennstoff kontinuierlich.

Da die vorbehandelten SNP i.d.R. schon einen Wassergehalt unter 30% aufweisen, ist eine nachfolgende Trocknung durch Belüftungskühlung – welche insbesondere auf die Selbsterwärmung in der Brennstoffmiete angewiesen ist – wenig sinnvoll und wirtschaftlich. Der betriebsinterne logistische Aufwand für die Nachbehandlung sowie die benötigte Infrastruktur (Gebäude, etc.) wäre zu hoch. Zusätzliche Schnittstellen im Trocknungsprozess zwischen mechanischer und thermischer Trocknung sind die Folge. Zudem wird die Flexibilität durch

die Abhängigkeit von der Witterung eingeschränkt. Insgesamt ist die Trocknungsleistung des Verfahrens zu gering sowie die Qualität der Trocknung nicht kalkulierbar.

#### 2.9.4.2 Belüftungstrocknung

Die Trocknung erfolgt ähnlich wie die Belüftungskühlung, jedoch durch einen Luftstrom mit warmer Außenluft der Sommermonate oder gering technisch angewärmter Außenluft (Erhöhung der Lufttemperatur um max. 3-5 K) welche mittels eines Gebläses kontinuierlich durch das Trocknungsgut geleitet wird. Eine sinnvolle Alternative wäre die Nutzung von Abwärme oder solar aufgewärmter Trocknungsluft (z.B. Dachraumabsaugung). Um einen gleichmäßigen Strömungswiderstand und damit eine gleichmäßige Trocknung zu erreichen, sollte die Schüttung gleichmäßig hoch sein (KALTSCHMITT, 2009, S. 324).

Auch bei diesem Verfahren ist die Flexibilität durch die Witterung eingeschränkt. Auch eine nachgeschaltete Belüftungstrocknung stellt hohe Anforderungen an die betriebliche Logistik und die Infrastruktur (Gebäude, etc.). Zwischen mechanischer und thermischer Trocknung werden i.d.R. zusätzliche Schnittstellen geschaffen.

#### **Vorteile:**

- Niedrigere Endwassergehalte als bei Belüftungskühlung

#### **Nachteile:**

- Nur in warmer Witterungsperiode einsetzbar (Sommer)
- Höherer Energieeinsatz durch kontinuierliche Belüftung
- Trockensubstanzverlust findet dennoch statt
- In einer Versuchsreihe wurden nur ungleichmäßige Wassergehalte in der Schüttung erzielt
- Trockenleistung zu gering

#### 2.9.4.3 Warmlufttrocknung

Die Trocknung erfolgt im Unterschied zur Belüftungstrocknung mit stärker angewärmter Luft (Luftanwärmung von 20 bis 100 K). Mittels eines Gebläses wird die Trocknungsluft durch den Brennstoff geleitet. Dies macht eine Wärmequelle höherer Leistung erforderlich. Für den Trocknungsvorgang wird i.d.R. neben dem Lagerbehälter ein Trocknungsbehälter oder eine Durchlauf-trocknungseinrichtung benötigt. Neben Heizsystemen kann zur Luftanwärmung auch Abwärme genutzt werden (KALTSCHMITT, 2009, S. 325).

#### **Vorteile:**

- Trocknung unabhängig von klimatischen Einflüssen, ganzjährig verfügbar
- Stets gleichmäßige Trocknerleistung
- Trocknung nur vom Schüttgut abhängig (Fraktion, Wassergehalt)
- Reduzierung der Trocknungszeit zu natürlichen Methoden, der Pilzentwicklung

#### **Nachteile:**

- Investition und technischer Aufwand hoch
- Durch hohe Wasseraufnahme der Trocknungsluft kommt es zur Kondensation im Gutstock und an Gebäudeteilen mit der Folge von Pilzentwicklung

#### 2.9.4.4 Heißlufttrocknung

Bei der Heißlufttrocknung wird das Trocknungsgut mit heißer Luft in einem Temperaturbereich von 300 – 600°C in Trommeltrocknern (Drehrohtrocknern) getrocknet. Durch die hohe Wasserabgabe erreicht das Trocknungsgut mit Ende der Trocknungstrommel max. 65 – 80°C. Bei der Heißlufttrocknung muss eine Direktbeheizung angewendet werden. Heiße Verbrennungsgase zusammen mit Frischluft bilden das Trocknungsmedium. Dieses Verfahren leistet mit 2000 – 25000 kg Wasserverdampfung/h die höchste Durchsatzleistung auf. Die Trocknungsdauer beträgt 5 – 10 Minuten (KALTSCHMITT, 2009, S. 326).

### 2.9.5 Zusammenfassende Beurteilung der Trocknungsverfahren

Durch die Faktoren Trocknungsdauer und -leistung, Flexibilität, Platzbedarf, Personaleinsatz und Qualität des Trockengutes (d.h. eine ausreichend sichere Vorhersage der Qualität nach CEN/TS 14961) lassen zum derzeitigen Forschungsstand **natürliche, kombinierte** sowie **technische Verfahren als Satz Trocknungsverfahren** ausschließen.

### 2.10 Systeme und Bewertung technischer Trocknungsverfahren

Nach Ergebnissen der TU Dresden kann eine technische Trocknung nur lohnend sein, wenn Abwärme genutzt werden kann und günstige logistische Bedingungen vorherrschen (BRUMMACK, 2008). Wird ein technisches Trocknungsverfahren angewandt, sollte es hinreichend effizient sein. Der durch die Trocknung verursachte Energieaufwand sollte deutlich unter dem Energiegewinn liegen (GROßE, 2008, S. 7).

#### 2.10.1 Satzrockner

Bei Trocknungssystemen ohne Gutförderung ruht der Brennstoff während der Trocknung; es sind Umlaufrockner. Systeme ohne Gutförderung sind Umlaufrockner (KALTSCHMITT 2009, S. 329). Lediglich eine Trocknungsgutcharge wird kontinuierlich getrocknet und umgeschichtet (Satzrockner). Diese Systeme lassen sich durch Frontlader, Förderbänder oder durch Abkippen befüllen oder entleeren.

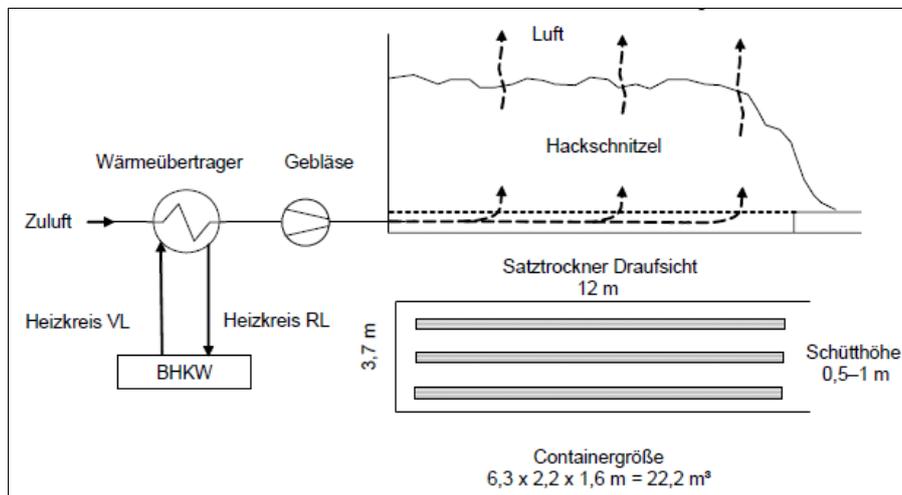
Bei diesem Verfahren wird die Trocknungsluft über Kanäle von unten durch den Brennstoff geleitet. Bei Satzrocknern handelt es sich meist um Silos für den Außen- und Innenbereich, um kastenartige Einbauten in Gebäuden oder um Container (ebd. 2009, S. 326). Satzrockner weisen eine geringe Verarbeitungskapazität auf, sind jedoch in der Anschaffung günstiger. Die geringere Größe sowie die Flexibilität der Trocknungsgüter bieten gute Voraussetzungen für die Eigenbedarfsdeckung. Die eingesetzte Wärme wird im Trocknungsprozess nur schlecht ausgenutzt (SCHULZ 2007, S. 9). Ein großes Problem von Satzrocknungsverfahren wird allgemein in der unzureichenden Homogenität des Trocknungsgrades gesehen. Dies wirkt sich vorwiegend in der Ausbildung von Feuchtenestern im Trocknungsgut aus.

**Tabelle 11:** Eigenschaften der Satz Trocknungsverfahren

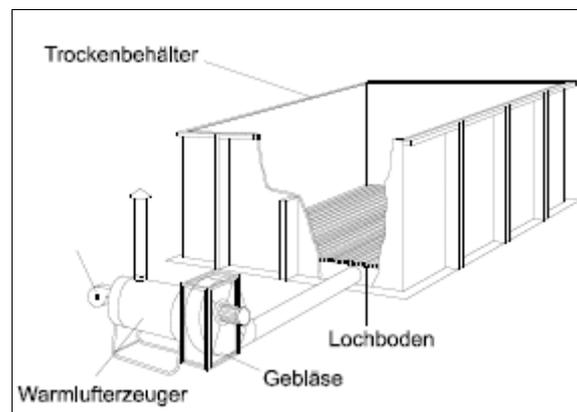
<b>Eigenschaften</b> (WAGNER 2010; SCHULZ 2007, S. 9 ff.; KALTSCHMITT 2009, S. 329 ff.)	
+	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfaches Verfahren</li> <li>▪ Günstige Investitionskosten</li> <li>▪ Meist geringerer Platzbedarf</li> <li>▪ Flexibilität der Trocknungsgüter</li> <li>▪ Eher für Eigenbedarfsdeckung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geringe Verarbeitungskapazität</li> <li>▪ Schlechte Energieeffizienz / Wirkungsgrad</li> <li>▪ Kein gleichmäßiger Wassergehalt nach Trocknung (Feuchtenester)</li> </ul>

2.10.1.1 Containertrocknung

Bei der Containertrocknung gibt es verschiedene Varianten, die dem Prinzip nach der Satz-trocknung entsprechen.



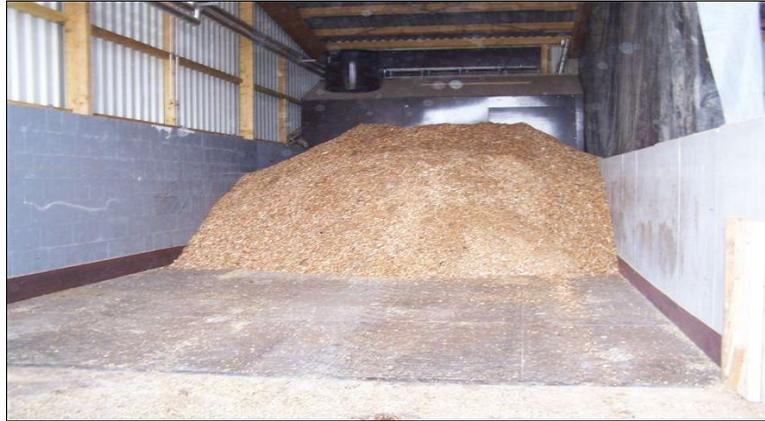
**Abbildung 20:** Satzrocknung im Schema (WAGNER, 2010)



**Abbildung 21:** Satzrocknung als Containertrockner (HARTMANN, 2007, S. 54)

2.10.1.2 Flachlager

Flachlager sind Satzrocknungssysteme die fest in ein Gebäude eingebaut sind. Die Zuführung der Trocknungsluft findet über Lochbleche oder über Luftschlitze am Boden statt. Besonderes Merkmal ist die Befahrbarkeit zur Befüllung und Entleerung der Systeme.



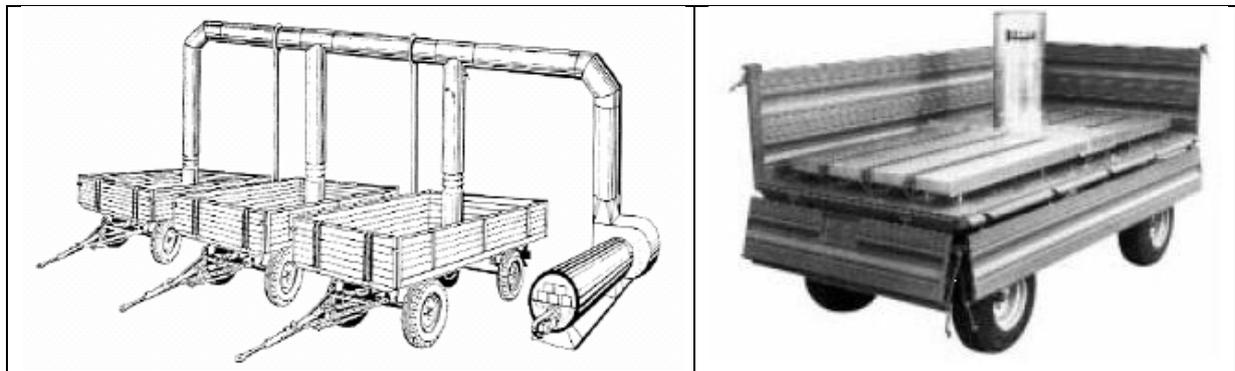
**Abbildung 22:** KWK-Trocknungsboden (AGROENERGIEN 2011)

### 2.10.1.3 Stapelraumtrockner

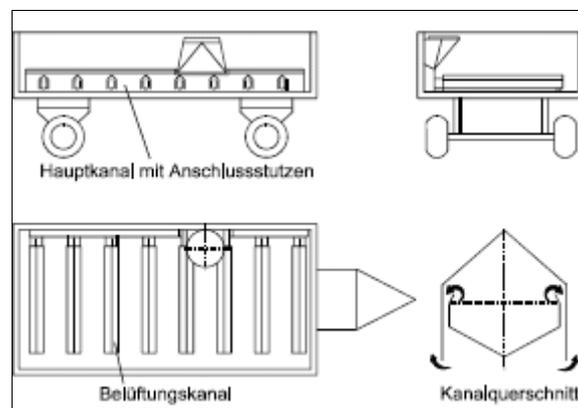
Werden bei Satz Trocknungsverfahren Teile der Gebäudehülle als Trocknerwandung mitverwendet spricht man von einem Stapelraumtrockner.

### 2.10.1.4 Wagentrockner

Das Satz Trocknungsverfahren kann auch mobil als sogenannter Wagentrockner angewendet werden. Dabei wird der Boden eines Transportanhängers mit einem Belüftungssystem ausgestattet, welcher per Schnellspannverschluss an ein Gebläse angeschlossen werden kann. Eine mobile Trocknung kann weiterhin auch in Wechselcontainern (Füllvolumen 40m<sup>3</sup>) verwirklicht werden. Eine weitere Umladung des Materials kann damit entfallen.



**Abbildung 23:** Wagentrocknung (SCHULZ, 2007, S. 10)



**Abbildung 24:** Bauweise eines Wagentrockners als Seitwärtskipper (HARTMANN, 2007, S. 54)

## 2.10.2 Durchlaufrockner (Systeme mit Gutförderung)

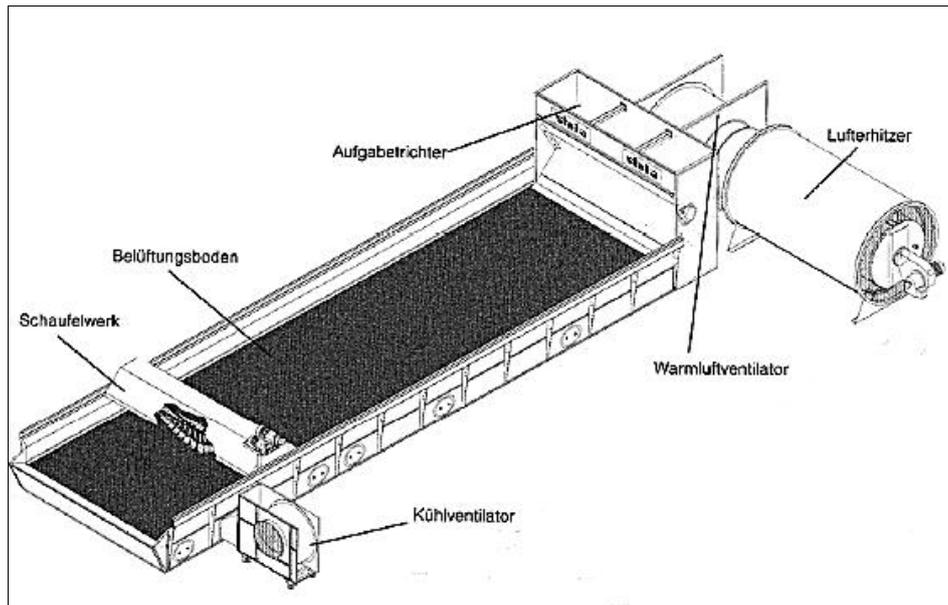
Trocknungssysteme mit Gutförderung können im Umlaufverfahren (eine Trocknungs-charge wird getrocknet und umgeschichtet) als auch im Durchlaufverfahren (kontinuierlicher Gutstrom) arbeiten. Die gängigsten kontinuierlichen Trocknungssysteme für Biomasserohstoffe sind Schubwendetrockner, Trommelrockner sowie Bandrockner (KALTSCHMITT, 2009, S. 329 ff.). Gegensätzlich zu den Satztrocknungsverfahren ist hier der Trocknungsprozess bei guter Wärmeausnutzung gut steuerbar. Diese Verfahren werden jedoch vorwiegend für hohe Durchsätze angeboten und weisen hohe Investitionsvolumina auf (SCHULZ, 2007, S. 9).

### 2.10.2.1 Schubwendetrockner

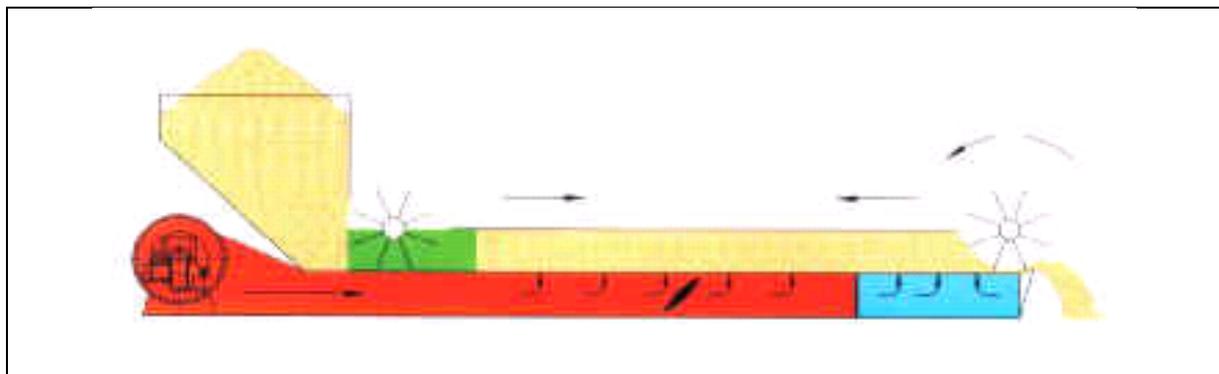
Schubwendetrockner sind als stationäre Anlagen oder auch mobil einsetzbar. Hierbei wird das Trocknungsgut kontinuierlich über einen Gitterboden bewegt, welcher erwärmte Trocknungsluft von unten durch den Brennstoff leitet. Die Schüttung beträgt bis zu 0,6 m. Vom Aufgabepunkt bis zur Entnahmeschnecke wird das Material mittels eines Schaufelwerkes ständig durchmischt. Bei kleinen Chargen ist auch ein Satzbetrieb möglich. Der Trocknungsverlauf lässt sich durch Steuerung der Produktzufuhr, regelbarer Drosselklappen (zur Trocknungsluftverteilung) sowie Einstellung der Trocknungstemperatur gut steuern. Diese Anlagen sind ab einer verfügbaren Wärmeleistung von 500 kW zu empfehlen.

**Tabelle 12:** Eigenschaften des Schubwendetrockners

<b>Eigenschaften</b> (WAGNER, 2010; SCHULZ, 2007, S. 9 ff.; KALTSCHMITT, 2009, S. 329 ff.)	
<b>+</b>	<b>-</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Große Durchsätze</li> <li>▪ Für geringe Trocknungstemperaturen (Abwärme) geeignet</li> <li>▪ Flexibilität der Trocknungsgüter</li> <li>▪ Hohe Energieeffizienz, weniger Strombedarf als Bandrockner</li> <li>▪ Gleichmäßige, einstellbare Trocknungsqualität</li> <li>▪ Auch mobil einsetzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Höherer Platzbedarf, jedoch geringer als bei Bandrocknern</li> <li>▪ Hohe Staubemissionen</li> <li>▪ Hohe Investitionskosten</li> </ul>



**Abbildung 25:** Schubwendetrockner (WAGNER, 2010)



**Abbildung 26:** Funktionsweise des Schubwendetrockners (Werkbild Fa. Stela)



**Abbildung 27:** Schubwendetrockner im Betrieb (Werkbild Fa. RIELA)



**Abbildung 28:** Schubwendetrockner mit im Einsatz befindlichem Wendewerk (<http://www.stela-drying-technology.de/de/produkte/schubwendetrockner/>)

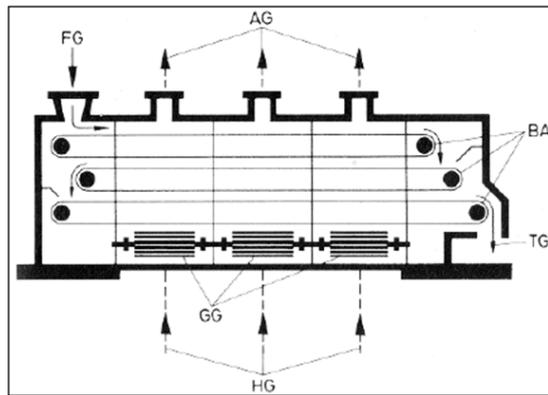
#### 2.10.2.2 Bandrockner

Bei Bandrocknern wird das Trocknungsgut auf einem luftdurchlässigem Band befördert, während ein Warmluftstrom durch das Band geleitet wird. Über Förderbänder oder Vibrorinnen wird das Material zugeführt und mittels eines Schneckenverteilers in einer dünnen Schicht auf dem Förderband aufgetragen. Der Wassergehalt wird am Ende des Förderbandes kontinuierlich gemessen. So kann über die Bandgeschwindigkeit sowie der Zulufttemperatur die gewünschte Endfeuchte geregelt werden (KALTSCHMITT 2009, S. 330). Bandrockner kommen ab einer verfügbaren Wärmequelle von 500 kW<sub>th</sub> als Verfahren in Frage (SCHULZ 2007, S. 10).

Bandrockner können ein großes Spektrum an Eingangsstoffen verarbeiten und sorgen während des Trocknungsvorganges auch für eine Durchmischung des Trocknungsgutes. Je nach Logistik werden Lagerkapazitäten für das Inputmaterial sowie für das getrocknete Gut benötigt.

**Tabelle 13:** Eigenschaften der Bandtrocknung

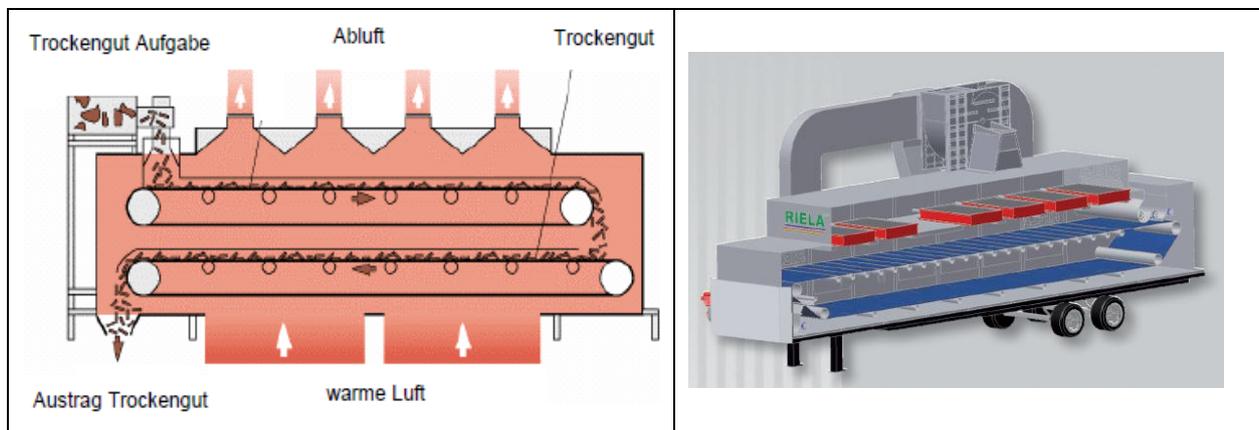
<b>Eigenschaften</b> (WAGNER, 2010; SCHULZ, 2007, S. 9 ff.; KALTSCHMITT, 2009, S. 329 ff.)	
+	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Große Durchsätze</li> <li>▪ Für geringe Trocknungstemperaturen (Abwärme) geeignet</li> <li>▪ Flexibilität der Trocknungsgüter</li> <li>▪ Geringe Emissionen</li> <li>▪ Hohe Energieeffizienz</li> <li>▪ Gleichmäßige, einstellbare Trocknungsqualität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hoher Platzbedarf</li> <li>▪ Hohe Investitionskosten</li> </ul>



Schema eines dreistöckigen Bandrockners

FG: Feuchtgutlauf, TG: Trockengutentnahme, BA: Endlosband, GG: Gasgebläse, HG: Heißgaseintritt, AG: Abgasaustritt

**Abbildung 29:** Bandrockner (SCHULZ, 2007, S. 11)



**Abbildung 30:** Bandrockner, 3-stöckig; Mobiler Einbandrockner (Werkbild RIELA)

### 2.10.2.3 Drehrohtrockner (Trommeltrockner)

Trommeltrockner transportieren unter zugeführter Heißluft das Trocknungsgut in einer leicht geneigten Trommel vom Aufgabepunkt kontinuierlich bis zum Ausgabepunkt. Diese rotieren während des Trocknungsvorganges mit bis zu 2 bis über 10 U/min. Als Trocknungsmedium kommt Heißluft, Abgas-Luft-Gemisch oder Heißdampf in Frage. Durch die Drehbewegung sowie die Hubschaufeln im trommelinneren wird das Gut ständig durchmischt. Die Verweilzeit des Trocknungsgutes ist abhängig von einigen Faktoren: Drehzahl, Trommelneigung, Strömungsgeschwindigkeit des Trocknungsgases, ggf. Stauvorrichtungen. Die Trocknungstemperatur beträgt zwischen 300 und 1000°C.

#### Vorteile:

- Hohe Trocknungsleistung durch hohe Wasserverdampfung

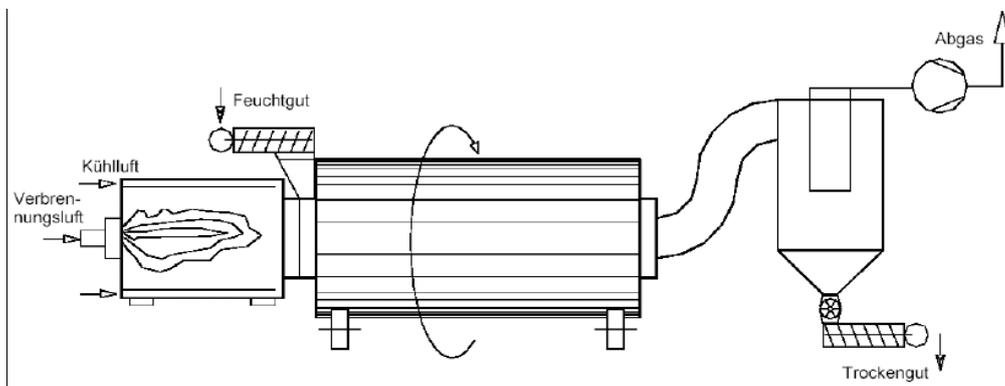
#### Nachteile:

- Hohe Emissionswerte, ggf. nötige Abluftreinigung
- Hoher Energieeinsatz
- Niedertemporierte Abwärme kann nicht genutzt werden
- Hohe Investitionskosten



**Abbildung 31:** Trommeltrockner stationär und mobil

(<http://www.stela-drying-technology.de/de/produkte/trommeltrockner/>)

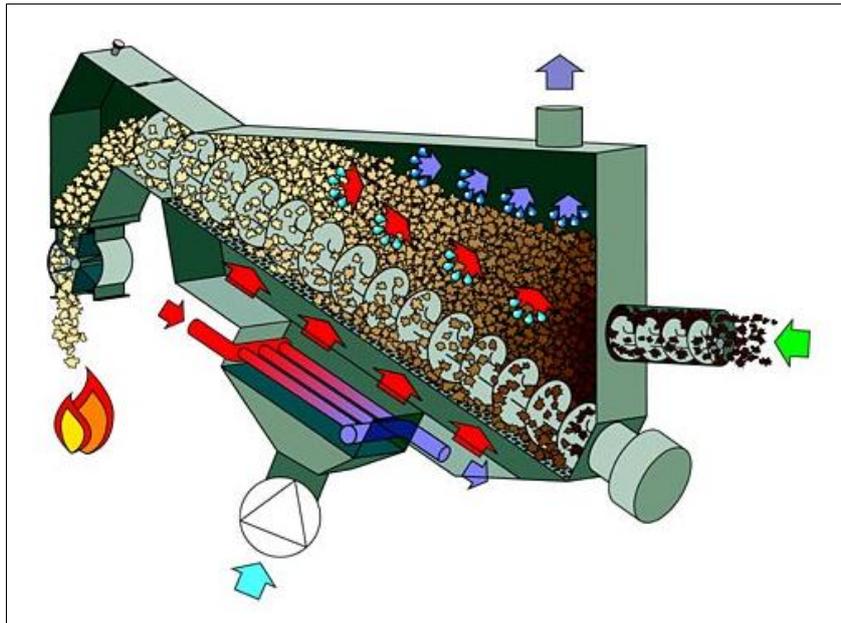


**Abbildung 32:** Schema Trommeltrockner (SCHULZ, 2007, S. 26)

Die hohen Trocknungstemperaturen machen deutlich, dass niedrigere Abwärmertemperaturen als Trocknungsmedium nicht geeignet sind.

#### 2.10.2.4 Schneckentrockner

Über einen Wärmetauscher wird Trocknungsluft in den Schneckentrockner eingeblasen. Durch die relativ lange Verweilzeit der Hackschnitzel in der Förderschnecke, kann die Trocknungsluft die Feuchtigkeit aus den Hackschnitzeln aufnehmen und abführen.



**Abbildung 33:** Schneckenrockner ([http://energieberatung.ibs-hlk.de/images/koeb\\_vortrockner.jpg](http://energieberatung.ibs-hlk.de/images/koeb_vortrockner.jpg))

Der Koeb-Schneckenrockner wird einem Hackschnitzelkessel zur Vortrocknung vorgeschaltet. Über einen Wärmetauscher kann die Wärme des Kessels zur Trocknung verwendet werden.

## 2.11 Bewertung von Trocknungsverfahren

Im Folgenden wird zum Stand der Technik die vorhandene Trocknungstechnologie aufgezeigt und auf einige Parameter hin untersucht. Bewertet werden die Verfahren hinsichtlich ihrer

- Wirtschaftlichkeit
- Energieeffizienz
- CO<sub>2</sub>-Bilanz, Ökobilanz
- Qualität der Trocknung (Auswirkungen auf den Brennstoff)

Folgende Anforderungen sollen durch das neue Trocknungsverfahren außerdem erfüllt werden:

<b>Nachhaltigkeit</b>	der minimale Verbrauch von fossilen Energieträgern zur Trocknung wird angestrebt
<b>Betriebssicherheit</b>	die Zielfeuchte soll witterungsunabhängig und weitgehend störungsfrei hergestellt werden können
<b>Kosten-Nutzen-Verhältnis</b>	flexibler Personaleinsatz, geringer Fixkostenanteil, minimaler Energieträgereinsatz

### 2.11.1 Wirtschaftlichkeit

Unter Wirtschaftlichkeit versteht man den Quotient aus Nutzen und Aufwand. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen dem erreichten Erfolg und dem dafür benötigten Mitteleinsatz.

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Im Projektkontext, zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit der Trocknungsverfahren, muss daher der monetär bewertete Mehrwert (Nutzen) dem monetär bewerteten Aufwand für die Trocknung entgegengesetzt werden. Liegt dieses Verhältnis über 1 kann durch die Trocknung ein Gewinn (betriebswirtschaftlich oder energetisch) erzielt werden.

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Monetär bewerteter Nutzen der Trocknung (in kWh, Erlös / Srm)}}{\text{Monetär bewerteter Aufwand (Stückkosten der Trocknung in z.B. €/Srm)}}$$

### 2.11.2 Energieeffizienz / Wirkungsgrad / CO<sub>2</sub>-Bilanz

Energieeffizienz ist ein Maß für die Ausnutzung eingesetzter Energie. Maximale Energieeffizienz ist hingegen gegeben, wenn ein gewünschter Nutzen mit möglichst wenig Energieeinsatz erreicht wird.

Im gegebenen Projektkontext bedeutet dies, z.B. mit möglichst wenig Energieaufwand einen bestimmten Wassergehalt in einem Brennstoff nach der Trocknung zu erzielen.

Aus Kosten- und Klimaschutzgründen muss der durch die Trocknung erzielte **Energiegewinn im Brennstoff** deutlich höher sein, als der **Energieaufwand der Trocknung**.

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Erbrachte Leistung (Abtrocknung des Brennstoffes um z.B. 30 WG-% oder auf 25% WG)}}{\text{Größe des Aufwandes (Leistung in kWh für Trocknung)}}$$

### 2.11.3 CO<sub>2</sub>-Bilanz

Der CO<sub>2</sub>-Verbrauch der Trocknungs- und Logistikprozesse des zu entwickelnden Trocknungsverfahrens für SNP (frei Sägewerk) muss für eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz geringer sein als der Energiezugewinn durch den Trocknungsprozess.

Das Trocknungsverfahren wird daher bezüglich des Kohlendioxidaustoßes je kWh gewonnene Energie (kg/kWh CO<sub>2</sub>) durch den Trocknungsprozess bewertet.

### 2.11.4 Qualität der Trocknung

Trocknungsverfahren haben – neben der Wassergehaltsabsenkung – unterschiedliche Auswirkungen auf den Brennstoff.

Grundsätzlich sollte darauf geachtet werden, dass der generierte Brennstoff des neuen Trocknungsverfahrens den Anforderungen der CEN/TS 14961 entspricht. Diese seit 2005 geltende Norm legt die Kennwerte für

- **Wassergehalt**
- **Aschegehalt**
- **Korngrößenverteilung**

- Schüttraumdichte
- Stickstoff- und Chlorgehalt
- Heiz- bzw. Brennwert

## 2.12 Beispiele für marktverfügbare technische Trocknungsverfahren

### 2.12.1 Kontinuierliche Trocknungsverfahren (Durchlauf Trocknung)

#### 2.12.1.1 Schubwendetrockner der Firma Stela HS 30

<b>Prinzip</b>	Kontinuierliches Trocknungsverfahren, auch Satz Trocknung möglich, Schubwendetrockner
<b>Trockenleistung</b>	Bei einer Wassergehaltsabsenkung von 45 auf 20% Wassergehalt etwa - 2,5 Srm/h - 60 Srm/Tag
<b>Wärmequelle</b>	- 450 kW - je Srm werden 200 kWh benötigt
<b>Trockengut</b>	Hackschnitzel
<b>Investitions- volumen</b>	80.000 – 120.000 €

#### 2.12.1.2 Schubwendetrockner der Firma Riela

<b>Prinzip</b>	Kontinuierliches Trocknungsverfahren, auch Satz Trocknung möglich, Schubwendetrockner
<b>Trockenleistung</b>	Bei Wassergehaltsabsenkung von 45 auf 20% Wassergehalt etwa - 3-5 Srm/h - 120 Srm/a Trocknungsmenge jedoch auf Austragsleistung von max. 7 Srm/h begrenzt
<b>Wärmequelle</b>	- 500 kW - je Srm 200 kW Wärmequelle - 4,5 kW elektrische Leistung
<b>Trockengut</b>	Hackschnitzel
<b>Investitions- volumen</b>	150.000 €
<b>Platzbedarf</b>	Gerätegröße: 2m x 15m, außen aufstellbar

#### 2.12.1.3 Eberl – Hackschnitzeltrockner (Eberl Trocknungsanlagen)

<b>Prinzip</b>	Kontinuierliches Trocknungsverfahren, Trommeltrockner
<b>Trockenleistung</b>	Bei Wassergehaltsabsenkung von 45 auf 20% Wassergehalt etwa - 2 Srm/h - 50 Srm/a Trockenleistung mit Aggregat zur Wärmeerzeugung - bis 100 Srm/Tag
<b>Wärmequelle</b>	- 200 kW

	- je Srm 100 kW Wärmequelle - 4,5 kW elektrische Leistung
<b>Trockengut</b>	Hackschnitzel
<b>Investitionsvolumen</b>	- 190.000 € mit Zubehör, Zuführ- und Abführeinrichtung - Trommeltrockner separat 136.000 €
<b>Kosten/ Srm</b>	bei 8000 MAS / Jahr 4,16 je Srm (Herstellerangaben!)



**Abbildung 34:** Eberl-Hackschnitzeltrockner ([www.eberl-trocknungsanlagen.de](http://www.eberl-trocknungsanlagen.de))

**Tabelle 14:** Kostenkalkulation je Srm (Herstellerangaben Fa. Eberl Trocknungstechnik)

Berechnung Hackschnitzeltrocknung Typ BMT inc. Vorratsbehälter bei Warmwasserheizung (Hackschnitzelheizung Vorlauf 90-95°C) bei 8000 Std. pro Jahr, bei 10°C Außentemperatur und d Hackschnitzel G30 mit einem Anfangswassergehalt von 40-50% und einem Endgehalt von ca. 20%					
Kosten pro m <sup>3</sup>					
Type		12,5/60	16/75	23/100	27/135
Trocknungsdauer pro m <sup>3</sup>	h/m <sup>3</sup>	4	2	1	0,5
Anlagekosten pro m <sup>3</sup> (Abschreibung auf 10 Jahre)	€/m <sup>3</sup>	2,75	1,55	1,26	1,06
Durchschnittl. Stromverbrauch pro m <sup>3</sup>	kW/m <sup>3</sup>	6	5	4,5	4
Stromkosten (0,15 €/kW)	€/m <sup>3</sup>	0,90	0,75	0,68	0,60
Gesamtkosten (Strom; Anlagenkosten)	€/m <sup>3</sup>	3,65	2,30	1,94	1,66
Durchschnittl. Wärmeverbrauch	kW/m <sup>3</sup>	140	120	110	100
Wärmekosten bei 2,5 Cent/kW mit Hackschnitzelheizung	€/m <sup>3</sup>	3,50	3,00	2,75	2,50
<b>Gesamtkosten (Strom, Wärme; Anlagenkosten)</b>	<b>€/m<sup>3</sup></b>	<b>7,15</b>	<b>5,30</b>	<b>4,69</b>	<b>4,16</b>

#### 2.12.1.4 Mühlböck – Hackgut und Spänetrockner (Mühlböck – Trocknungst.)

<b>Prinzip</b>	Kontinuierliches Trocknungsverfahren im Niedertemperaturbereich, Treppentrockner
<b>Trockenleistung</b>	Bei Wassergehaltsabsenkung von 50 auf 10% Wassergehalt je Modul etwa - 4 Srm/h - 95 Srm/a
<b>Wärmequelle</b>	- 370 kW - für 1 kg Wasserentzug ist der Energiebedarf etwa 1 kWh <sub>th</sub>
<b>Trockengut</b>	Hackschnitzel, Rinde, Späne, Sägemehl
<b>Investitionsvolumen</b>	- 120.000 € ohne Zufuhr- und Abführeinrichtungen je Modul - Trommeltrockner separat 136.000 €



**Abbildung 35:** Muehlboeck Hackgut- und Spaenetrockner (Werkbild Muehlboeck Trocknungstechnik)

2.12.1.5 Trocknungsanlage CDT 500 (ggm Industries)

Die Trocknungsanlage besteht aus 3 handelsueblichen 20 ft. Seecontainern. Das Trockengut wird per Radlader in den ersten Container, der mit einem Schubboden ausgestattet ist, gefuellt. Ueber eine Dosierschnecke wird das Trockengut dann in den seitlichen unten liegenden Container transportiert und dort durch einen Vibrosieb von Stoerstoffen befreit. Anschliessend wird das Trocknungsgut in den oberen Container in Trocknungsschaechte transportiert und mit erwarmter Luft getrocknet. Das feuchte Trocknungsgut wird von oben in die Trocknungsschaechte eingefuellt. Die Trocknungsluft wird horizontal durch die Trocknungsschaechte geleitet. Am Ende des Trocknungsschaechtes wird das getrocknete Material durch eine Schnecke nach auessen transportiert. Eine Messeinrichtung kontrolliert den eingestellten Wassergehalt.

Durch eine Ergaenzung weiterer Trocknungsschaechte kann die Trocknungsleistung erhoeht werden.

Die gesamte Technik wie Waermetauscher, Ventilator, Vibro-Sieb, Austragung, E-Steuerung und Kompressoranlage ist im unteren Container eingebaut. Die Reinigung des Gerates erfolgt vollautomatisch. Das Gerat kann problemlos abgebaut und an einem anderen Standort aufgebaut werden.

<b>Prinzip</b>	Kontinuierliche Containertrocknung
<b>Trockenleistung</b>	- 3,9 Srm/h, durch modulare Bauweise aufruestbar - Energieverbrauch von 1,2 kWh/kg Wasserverdunstung
<b>Waermequelle</b>	Abwaerme mit Vorlauftemperatur von 85-90 °C
<b>Trockengut</b>	Hackschnitzel und andere grobe Schuettgueuter

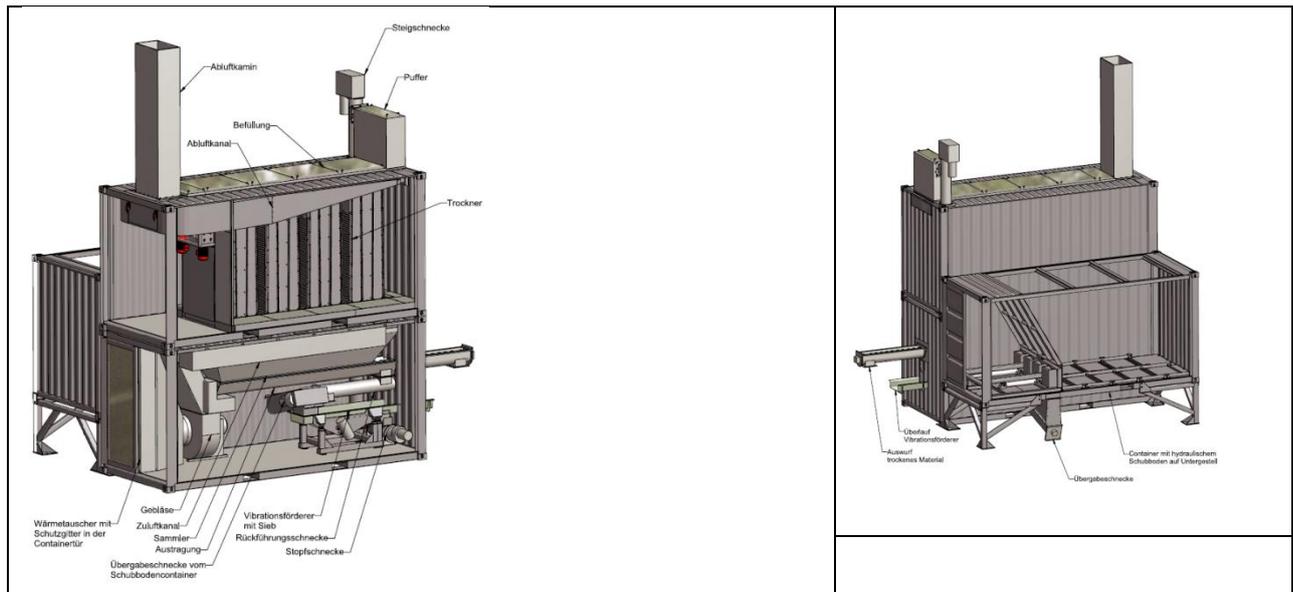


Abbildung 36: Trocknungsanlage CDT 500 (Werkbild ggm Industries)

### 2.12.1.6 Schubbodentrockner (Lunzner Energieerzeugung)

**Lunzner**  
Energieerzeugung UG & Co. KG

1. Heizregister 250 kw mit Anschlusssteil zum Ventilator

2. Radialventilator 12.000 m<sup>3</sup> Luft / h

3. Seitliche Luftführung mit neun regulierbaren Zuluftkästen und Revisionsöffnungen

4. Schubboden mit Hydraulikzylinder und Hydraulikpumpe

5. Querförderband 3 mtr. Länge zur Entleerung (nicht mit abgebildet)

**Schubbodentrockner 11 x 2 x 3 mtr. geeignet für**

- Hackschnitzel
- Miscanthus
- und ähnliche Biomasse

Befüllung von oben mit z. B. Radlader oder Förderband (nicht im Lieferumfang)  
Die Beförderung im Trockner bzw. der Austrag erfolgt über einen wartungsarmen Schubboden und einem 3 mtr. langen Querförderband.

Durch eine spezielle Konstruktion sind keine Betonarbeiten für den Schubboden nötig.

**Optional:**

- Abdeckung für Trockner
- Abluftführung nach Außen
- Heizregister mit anderen thermischen Leistungen
- el. Steuerung

Als Wärmequelle können z. B. sämtliche BHKW's (Biogas, Holzgas, Pflanzenöl) sowie sämtliche andere Heizquellen eingesetzt werden.

Abbildung 37: Schubbodentrockner (<http://www.holzenergiehof.com/lunzner/schubbodentrockner.jpg>)

Abbildung 37: Schubbodentrockner

### 2.12.1.7 Flachbettrockner (Neuero Hackschnitzeltrockner)

Der NEUERO Hackschnitzeltrockner arbeitet im Satz- oder Durchlaufverfahren. Befüllt wird der Container über einen Annahmetrichter. Die Abförderung des getrockneten Materials erfolgt über einen Drehschneckenausaug. Ein Radialventilator saugt die Trocknungsluft an und bläst sie von unten durch das Trocknungsgut. Der horizontale Materialtransport erfolgt über

Schubleisten über den Trocknungsboden. Die Leistungen der Anlage hängen von folgenden Faktoren ab:

- **Art und Qualität des Hackgutes**
- **Temperatur und Feuchte der Ware**
- **Schütthöhe und Schüttgewicht**
- **bei Abwärmenutzung Temperatur und Menge des Kühlwassers**
- **Satz- oder Durchlauftrocknung**

<b>Prinzip</b>	Kontinuierliches Trockungsverfahren, auch Satz Trocknung möglich; Flachbettrockner (40 cm Schütthöhe)
<b>Trockenleistung</b>	Bei Wassergehaltsabsenkung von 40 auf 15% Wassergehalt etwa - 1,25 Srm/h - 30 Srm/Tag (bei 10°C Außentemperatur, Warmlufttemperatur 70°C)
<b>Wärmequelle</b>	- 270 kW
<b>Trockengut</b>	Hackschnitzel
<b>Investitionsvolumen</b>	-
<b>Platzbedarf</b>	40 Fuß Container, Innenmaß 12 m Länge; 2,35 m Breite

## 2.12.2 Diskontinuierliche Verfahren (Satz Trocknung)

### 2.12.2.1 Lauber Energie Nutz Zentrale (Lauber Trocknungstechnik)

<b>Prinzip</b>	Satz Trocknung, Containertrocknung
<b>Trockenleistung</b>	- 33 Srm/ 40 Srm (je Containergröße) 1 – 2 Tage, - 0,5 – 1,5 Srm/h/Container  Abhängig von Grüngutanteil, Fraktionsgröße, Jahreszeit, Feinanteil Obergrenze (mit L-ENZ 650 und 6 angeschlossenen Containern) - 100 Srm/Tag
<b>Wärmequelle</b>	Je nach Modell, siehe unten
<b>Trockengut</b>	Hackschnitzel und andere grobe Schüttgüter
<b>Investitionsvolumen</b>	<b>L-ENZ Zentrale</b> - L-ENZ 150: 26.000 € - L-ENZ 370: 32.000 € - L-ENZ 650: 43.000 €  <b>Container</b> - 6000 – 7000 €/Stk.

Die **L-ENZ Zentrale** ist in 3 Standardgrößen erhältlich:

L-ENZ 150	5,5 kW elektrisch	150 kW thermisch » Anschlüsse für 2 Container
L-ENZ 370	11 kW elektrisch	370 kW thermisch » Anschlüsse für 4 Container
L-ENZ 650	18,5 kW elektrisch	650 kW thermisch » Anschlüsse für 6 Container

Eine Besonderheit dieses Satz Trocknungssystems ist die Hackschnitzeltrocknung in Abrollcontainer. Nach der Trocknung können diese sofort vom LKW zur Auslieferung aufgenommen werden. Eine Andockstation erleichtert das Erstellen der Verbindung zwischen Container und Belüftungskanal.

### **2.13 Effizienz konventioneller Trocknungsverfahren**

Folgende Unterkapitel zeigen die Effizienz derzeitiger konventioneller (thermisch-konvektiv arbeitender) Trocknungsverfahren. Je kg Wasserentzug muss Energie von über 1 kWh bis zu 2 kWh (im Mittel etwa 1,5 kWh/kg Wasser) eingesetzt werden. Je Srm entspricht das einem Energieeinsatz von etwa 150 kWh/Srm (bei WG-Absenkung von 50 (45) - 20 %). Je kg Wasserentzug muss bei der Schnittholztrocknung mehr Energie eingesetzt werden.

**Tabelle 15:** Effizienz technischer Trocknungsverfahren

Trocknungsverfahren	WG <sub>Anfang</sub>	WG <sub>Ende</sub>	Wasser- verdampfung	Energieverbrauch			
				thermisch kWh/Srm	elektrisch kWh/Srm	Gesamt	
	%	%	l			kWh/Srm	kWh/kg
<b>Hackschnitzel- trocknung</b>							
Lauber SCT	50	20	117	130	4	134	1,1
Mühlböck	50	10	139	120	1	121	0,9
Rila HS30 SWT	45	20	89	126	1,2	127	1,4
Stela SWT	45	20	89	181	1,2	182	2
GGM KCT	45	15	100	123	6	126	1,3
Eberl TT	45	20	89	100	2,3	102	1,1
<b>Schittholztrocknung</b>							
Frischluff- Ablufttrocknung	Hartholz						1,0 - 2,2
	Weichholz						0,7 - 1,7

SCT = Satzcontainertrocknung, SWT = Schubwendetrockner, TT = Trommelrockner, KCT = Kontinuierlicher Containertrockner

**Tabelle 16:** Effizienz und Wirkungsgrad marktgängiger technischer Trocknungsverfahren

Trocknungs- verfahren	Wassergehalts- reduktion	Energiegehalt		Wasser- entzug	Energie- gewinn		Energieinput (-aufwand)			Wirkungsgrad		
		vor Trocknung	nach Trocknung		thermisch	elektrisch	Gesamt	Output / Input	Input je gewonnener kWh	kWh / l (kg) Wasser		
		[%]	kWh/Srm		kWh/Srm	kg	kWh/Srm	%	kWh/Srm	kWh/Srm	kWh/Srm	
LENZ (Lauber Energie Nutz Zentrale)	50 - 20	685,0	763,0	117,0	78,0	11,4	130,0	4,0	134,0	0,6	1,7	1,1
Mühlböck Hackgut und Spänetrockner	50 - 10	685,0	777,0	139,0	92,0	13,4	120,0	1,0	121,0	0,8	1,3	0,9
Rila, Schubwendetrockner	45 - 20	704,0	763,0	89,0	59,0	8,4	126,0	1,2	127,2	0,5	2,2	1,4
Stela, Schubwendetrockner	45 - 20	704,0	763,0	89,0	59,0	8,4	181,0	1,2	182,2	0,3	3,1	2,0
GGM Containersystem	45 - 15	704,0	770,0	100,0	66,0	9,4	123,0	6,0	129,0	0,5	2,0	1,3
Rila RST 2-15; SWT	40 - 15	720,0	770,0	77,0	50,0	6,9	125,0	1,2	126,2	0,4	2,5	1,6
Eberl Hackschnitzel- trockner, Trommeltr.	45 - 20	704,0	763,0	89,0	59,0	8,4	100,0	2,3	102,3	0,6	1,7	1,1
LENZ (Lauber Energie Nutz Zentrale)	Werksangaben Datenblatt	Werte aus den Schriften der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.		eigene Berechnungen nach der Formel zur Berechnung der Wassermasse aus Hackschnitzel (KALTSCHMITT 2009, S. 317)	eigene Berech- nungen	Bsp: L-ENZ 650 ; Werksangaben umgerechnet	Werksangaben Datenblatt	eigene Berechnungen				
Mühlböck Hackgut und Spänetrockner	Werksangaben Datenblatt					Werksangaben Datenblatt						
Rila, SWT	Werksangaben telefonisch					Werksangaben telefonisch						
Stela, SWT	Werksangaben telefonisch					Werksangaben telefonisch						
GGM Containersystem	Werksangaben Datenblatt					Werksangaben umgerechnet						
Rila RST 2-15; SWT	Werksangaben Datenblatt					Werksangaben umgerechnet						
Eberl Hackschnitzel- trockner	Werksangaben Datenblatt					Werksangaben umgerechnet						

Aus rein energetischer Sicht weisen die derzeitigen Trocknungsverfahren alle eine negative Energiebilanz auf. Für den Trocknungsprozess muss mehr Energie aufgewandt werden, als der Brennstoff durch Trocknung an Energie gewinnt.

Natürliche (nicht technische) Trocknungsverfahren weisen eine positive Energiebilanz auf (siehe Output: Input Verhältnis). Hier wird keine bzw. weniger elektrische oder thermische Energie für den Trocknungsprozess zugeführt. Die nachstehende Abbildung verdeutlicht dies.

**Tabelle 17:** Effizienz von Hackschnitzeltrocknungsverfahren, (BRUMMACK 2008)

	Trocknungsverfahren für Hackschnitzel	Primärenergieaufwand MJ / t <sub>atro</sub>	Veränderung der Energiebilanz, MJ / t <sub>box</sub> bei versch. Wassergehalt des Endproduktes, Output : Input
1			Basis: Hackschnitzel, Pappel, 50 % Wassergehalt mit H <sub>u</sub> = 7.670 MJ / t <sub>50</sub> (vgl. Abb. 2) Input analog Tab. 2 bis Hackschnitzelproduktion: 500 MJ / t <sub>atro</sub> ; Output: Input = 15
2	Belüftungskühlung ("Kaltbelüftung") ➢ Elektro-Lüftungsgebläse incl. Strömungskanäle; nach HARTMANN/STREHLER (1995), ergänzt	77 <sup>1</sup>	Output: Hackschnitzel, Pappel, 20 % Wassergehalt mit H <sub>u</sub> = 13.860 MJ / t <sub>20</sub> , Input: (500 + 77) MJ / t <sub>atro</sub> Output: Input = 24
3	Wärmelufttrocknung ➢ Heizanlage und ➢ Elektro-Lüftungsgebläse incl. Strömungskanäle; nach HARTMANN/STREHLER (1995), ergänzt	416 <sup>1</sup>	Output: Hackschnitzel, Pappel, 20 % Wassergehalt mit H <sub>u</sub> = 13.860 MJ / t <sub>20</sub> , Input: (500 + 416) MJ / t <sub>atro</sub> Output: Input = 15
4	Dombelüftungsverfahren ➢ 3 Dome / 8 Kanäle zuz. 540 m <sup>2</sup> Abdeckvlies; Ausgangswerte nach BRUMMACK (2006), ergänzt	12	Output: Hackschnitzel, Pappel, 20 % Wassergehalt mit H <sub>u</sub> = 13.860 MJ / t <sub>20</sub> , Input: (500 + 12) MJ / t <sub>atro</sub> Output: Input = 27

## 2.14 Umgang mit Emissionen aus der Holztrocknung

Technische Trocknungsanlagen führen je nach Verfahren zu Emissionen von Abluft, Abwasser und Lärm. Der Abdampf von Frischluft-Abluftkammern unterliegt den Emissionsgrenzwerten der TA Luft. Bei Kondensations- und Vakuumanlagen hingegen wird das dem Holz entzogene Wasser mittels Kondensation abgeführt und fällt damit in flüssiger Form an und unterliegt damit den Abwasserentsorgungsrichtlinien. Oftmals wird ein Teil des Kondensats durch Einsprühen wieder in das Trocknungssystem zurückgeführt (TRÜBSWETTER 2006, S.91-92). Das restliche Kondensat muss als Abwasser entsorgt werden. (TRÜBSWETTER 2006, S.186-187)

Im Forschungsprojekt InnoDry zur mechanischen Trocknung von Hackschnitzeln fiel das dem Holz entzogene Wasser ebenfalls in flüssiger Form an. Es wird im folgenden Bericht als Presswasser bezeichnet.

Prinzipiell musste nun geklärt werden, ob es sich bei diesem Presswasser um ein zu entsorgendes Abwasser oder um ein stofflich verwertbares Produkt handelt.

Das bei der mechanischen Pressung der Hackschnitzel abgeführte Wasser ist hauptsächlich „feines, ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen [und] gebundenes Wasser in den Holzfasern“ (KALTSCHMITT, 2009, S.315).

Damit ist im Presswasser mit verschiedenen Extraktstoffen (wie Harze, Öle, Terpene, Fettsäuren, Wachs, Aldehyde, Phenole, Zucker, Tannine) und anorganischen Mineralien und Verbindungen zu rechnen. (WAGENFÜHR, SCHOLZ, 2012, S.64 -74)

Um Aussagen zur stofflichen Verwertbarkeit des Presswassers treffen zu können, müssen die Inhaltsstoffe der Presswasserproben identifiziert werden.

Hingegen geben Analyseergebnisse der abwasserrelevanten Parameter im anfallenden Presswasser Aufschluss darüber, wie mit dem Presswasser als Abwasser verfahren werden kann und welche Kosten dadurch im Einzelfall entstehen.

## 2.14.1 Rechtliche Rahmenbedingungen für Abwasserentsorgung

Soll das anfallende Presswasser als Abwasser entsorgt werden, müssen entsprechende rechtliche Vorgaben eingehalten werden.

Eine Übersicht zu relevanten rechtlichen Regelungen mit stichpunktartigen Erläuterungen findet sich in Tabelle 18.

**Tabelle 18:** Zur Abwasserentsorgung relevante rechtliche Regelungen (ERBGUTH, SCHLÄCKE 2010, S. 256 – 278)

<b>Europarecht:</b>	
EG- Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG Umweltpolitische Zielsetzungen und zugehöriges Maßnahmenprogramm zur Erreichung eines guten Zustandes in allen Gewässern innerhalb von 15 Jahren	
<b>Bundesrecht:</b>	
<b>Wasserhaushaltsgesetz WHG (2009)</b> §8 WHG Erlaubnis- und Bewilligungserfordernis für wesentliche Gewässerbenutzungen (z.B. Einleiten von Stoffen in Gewässer) §57 WHG Genehmigungs- und Versagungsgründe für Abwassereinleitungen in Gewässer Anhang 2 WHG mit 12 Kriterien für den Stand der Technik (SdT)	<b>Abwasserabgabengesetz AbwAG (2005)</b> Rechtsgrundlage des Gewässerschutzes Abgabepflicht für Abwassereinleiter (Direkteinleiter) als ergänzende Maßnahme. § 3 (1) AbwAG: Bewertungsgrundlage: Abgabenerhebung entsprechend der Schädlichkeit und Menge des Abwassers, bemessen in sog. Schadeinheiten – Anlage zu §3 AbwAG für die Parameter: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Oxidierbare Stoffe</li> <li>▪ Phosphor</li> <li>▪ Stickstoff</li> <li>▪ Organische Halogenverbindungen</li> <li>▪ Metalle (Hg, Cd, Cr, Ni, Pb, Cu)</li> <li>▪ Giftigkeit gegenüber Fischeiern</li> </ul>
§ 7a Abs. 1 und Abs. 2 WHG: Ermächtigungsgrundlage für die Bundesregierung zur Festlegung der Anforderungen, die dem Stand der Technik entsprechen	§ 3 Abs. 4 AbwAG: Ermächtigungsgrundlage für die Bundesregierung zur Anpassung der Verfahren zur Bestimmung der Schädlichkeit an den jeweiligen Stand der Wissenschaft und Technik
<b>Abwasserverordnung AbwV (2004):</b>	
Regelungen der Anforderungen für das Einleiten von Abwasser in Gewässer im Rahmen der kommunalen, gewerblichen und industriellen Abwasserbehandlung: Anforderungen nach dem Stand der Technik in 57 branchenspezifischen Anhängen als Emissionsgrenzwerte (Konzentrationswerte und teilweise Frachtwerte)	
<b>Landeswassergesetze: für Baden-Württemberg</b>	
Selbstständige Regelungen für Maßnahmen und Anlagen, die sich auf Gewässer und ihrer Nutzung auswirken können, und für das Recht der Gefahrenabwehr	
<b>Wassergesetz Baden-Württemberg WG (2005):</b> §13 (5): Geltungsbereich des WHG und des WG für die Benutzung der Gewässer, als Aufbringen von Abwasser, welches die Eigenschaften von Wasser nachteilig verändern kann §45: Begriffsbestimmung von Abwasser und Abwasserbeseitigung, Abwasserbeseitigung obliegt den Gemeinden § 45k: Ermächtigungsgrundlage der obersten Wasserbehörde zur Festlegung von Anforderungen für Abwasser zur Indirekteinleitung in einer Rechtsverordnung	<b>Indirekteinleiterverordnung IndVO (2007):</b> Die in der AbwV festgelegten Anforderungen an das Abwasser gelten auch für Indirekteinleiter. Genehmigungspflicht zur Indirekteinleitung, abhängig von der Überschreitung vorgegebener Konzentrations- und Frachtwerte bestimmter Abwasserinhaltsstoffe, gemäß den Anhängen zur Abwasserverordnung (57 branchenspezifische Anhänge)
<b>Regionale und örtliche Ebene:</b>	
Fragen der Abwasserbeseitigung über gemeindliche Entwässerungsanlagen. Satzungsrecht der Gemeinden und der Wasser- und Bodenverbände	
Gemeinden dürfen in einer Ortssatzung eigene Anforderungen an die Indirekteinleitungen festlegen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kommunale Abwassersatzungen</li> <li>▪ Satzungen der Zweck- und Abwasserverbände</li> </ul>	
Satzung über die öffentliche Abwasser-beseitigung (Abwassersatzung – AbwS) der Gemeinde Nordach (2012)	Satzung über die öffentliche Abwasserbeseitigung (Abwassersatzung – AbwS) der Gemeinde Seebach, Ortenaukreis (1983, Änderung 1987, 2001 u. 2011)

<p>§ 6 (2): Insbesondere sind ausgeschlossen [von der öffentlichen Abwasserbeseitigung] (...) 7. Abwasser, dessen Beschaffenheit oder Inhaltsstoffe über den Richtwerten des Anhangs A. 1 des Merkblatts DWA-M 115-2 vom Juli 2005 (Herausgeber/Vertrieb: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. – DWA –, Theodor-Heuss-Allee 17, 53773 Hennef) liegen. § 42 Höhe der Abwassergebühr: Schmutzwassergebühr beträgt je m<sup>3</sup> Abwasser 2,51 €</p> <p>Anhang A. 1 des Merkblatts DWA-M 115-2 vom Juli 2005: Richtwerte für die Einleitungen nicht häuslichen Abwassers in öffentliche Abwasseranlagen, z.B. pH: 6,5 – 10,0</p>	<p>§ 6 : Allgemeine Ausschlüsse (...) 7. Abwasser, dessen Beschaffenheit oder Inhaltsstoffe über den Richtwerten des Anhangs A. 1 des Merkblatts DWA-M 115-2 vom Juli 2005 (Herausgeber/Vertrieb: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. – DWA –, Theodor-Heuss-Allee 17, 53773 Hennef) liegen. §42 Höhe der Abwassergebühr: (1) Abwassergebühr bei Einleitungen nach §38 Abs. 1 und 2 beträgt je m<sup>3</sup> Abwasser € 2,35. Anhang A. 1 des Merkblatts DWA-M 115-2 vom Juli 2005: Richtwerte für die Einleitungen nicht häuslichen Abwassers in öffentliche Abwasseranlagen, z.B. pH: 6,5 – 10,0</p>
--	---

Die rechtlichen Regelungen betreffen damit sowohl das direkte Einbringen des Abwassers in ein oberirdisches Fließgewässer – die Direkteinleitung – wie auch die Abgabe des Abwassers an eine kommunale Abwasserreinigungsanlage – die Indirekt-einleitung.

Die **Direkteinleitung** ist nach § 8 des Wasserhaushaltsgesetzes als Benutzung von Gewässer erlaubnis- oder bewilligungspflichtig, bedarf also einer wasserrechtlichen Genehmigung, die sowohl anlagenbezogene (z.B. Abwasserbehandlungsanlage) wie auch stoffbezogene Anforderungen (Einstufung von wassergefährdenden Stoffen oder Bestimmung von Schmutzfrachten) enthält. Die Erlaubnis/Genehmigung ist bei der unteren Wasserbehörde des Landkreises, dem Amt für Umweltschutz als zuständige Rechtsbehörde, zu beantragen. Sie darf nur erteilt werden, wenn die Schadstofffracht und der Abwasseranfall so gering gehalten werden, wie dies nach dem Stand der Technik möglich ist. Die Abwasserverordnung (AbwV) mit ihren 57 branchenspezifischen Anhängen legt dazu konkrete Emissionsgrenzwerte für eine Direkteinleitung fest.

Das Abwasserabgabengesetz (AbwAG) regelt im Fall von Direkteinleitung die Abwasserabgabe, die von den Ländern erhoben wird. Diese Abwasserabgabe richtet sich nach der Menge und Schädlichkeit des Abwassers. Bemessungsgrößen sind die sog. Schadeinheiten. Die Schadeinheiten ergeben sich pro Schadstoff oder Schadstoffgruppe nach der Schadstoffmenge und der Konzentration. Bestimmte Schwellenwerte dürfen aber nicht überschritten werden.

Bei dem Prozess der mechanischen Trocknung von Hackschnitzel handelt es sich allerdings um ein neues Verfahren, das keine Entsprechung in den Anhängen der AbwV besitzt. Möglicherweise könnten die Vorgaben in Anhang 13 der AbwV zu Holzfaserplatten eine Orientierung geben.

**Tabelle 19:** Auszug aus Anhang 13 der AbwV zu Holzfaserplatten

	Qualifizierte Stichprobe oder 2-Stunden-Mischprobe	
Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen (BSB <sub>5</sub> )	[kg/t]	0,2
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	[kg/t]	1
Phenolindex nach Destillation und Farbstoffextraktion	[g/t]	0,3
Giftigkeit gegenüber Fischeiern (G <sub>Ei</sub> )		2
An das Abwasser wird vor der Vermischung mit anderem Abwasser für adsorbierbare, organisch gebundene Halogene (AOX) eine Anforderung von 0,3 g/t gestellt.		

Kann aufgrund der ermittelten Schadstofffracht des Presswassers für die Direkteinleitung keine Genehmigung erteilt werden, kann entweder eine Reinigungsstufe vorgeschaltet und die Abwasserwerte erneut geprüft werden oder das Presswasser wird über die Kanalisation an eine öffentliche Abwasseranlage, z.B. an eine kommunale Kläranlage abgegeben – die Indirekteinleitung.

**Indirekteinleitungen** werden in der Indirekteinleiterverordnung (IndVO) geregelt. Nach § 2 IndVO gelten für Abwasser nicht-häuslicher Herkunft ebenfalls die Anforderungen der Abwasserverordnung.

Wenn das Abwasser aus einem industriellen oder gewerblichen Betrieb stammt, der im Anhang 1-57 der Abwasserverordnung genannt wird, ist auch hier eine Genehmigung der unteren Wasserbehörde erforderlich (§5(1) IndVO). Für diese Herkunftsbereiche sind bestimmte Anforderungen an das Abwasser vor Vermischung oder für den Ort des Anfalls festgelegt.

Die Genehmigungspflicht entfällt, wenn die Schwellenwerte (Konzentrations- oder Frachtwerte) der Parameter im Anhang der IndVO unterschritten werden (§ 5 Abs. 2 Satz 3).

Zuständig für Indirekteinleitungen sind die Gemeinden vor Ort und bedürfen der schriftlichen Genehmigung. Einleitungsbeschränkungen, Abwasseruntersuchungen und Eigenkontrollen können von den Gemeinden vorgenommen werden.

Physikalische oder chemische Abwasserreinigungen können vor der Einleitung von der Gemeinde festgelegt werden.

Die Gemeinden können in ihren jeweiligen kommunalen Abwassersatzungen für die Einleitung nicht-häuslicher Abwässer in die Kanalisation ergänzende Anforderungen definieren. Diese richten sich vor allem nach der Größe und der Reinigungsleistung der kommunalen Kläranlagen sowie nach den zu erwartenden Abwassermengen.

Daneben können die Gemeinden in ihren Abwassersatzungen Abwassergebühren erheben.

### **2.14.2 Stoffliche Verwertung des Presswassers**

Holz-Extraktstoffe (wie z.B. Terpenverbindungen, organische nieder- und höhermolekulare Säuren und Harze) entstehen als Nebenprodukte bei der industriellen Holz Trocknung (Holzwerkstoffindustrie) und könnten je nach Zusammensetzung und Qualität als Rohstoff für die chemische, pharmazeutische, Aroma- und Kosmetikindustrie genutzt werden. (BORMANN et al., 2006, S. 3-4)

In den Untersuchungen zur Gewinnung von Holzextrakten im Technikumstrockner (Kreisgastrockner) des WKI (Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm–Klauditz-Institut) konnte eine Aufkonzentration der Holzinhaltstoffe erzielt werden. Auch zeigten die Versuche von Bormann et al. im Jahr 2006, dass „in den rückgewinnbaren Extrakten aus der Holz Trocknung grundsätzlich eine Reihe von natürlichen Verbindungen vorliegen, die auch bei der Herstellung von Riech- und Geschmacksstoffen eingesetzt werden“ könnten. Allerdings sind diese „Stoffe (...) derzeit [2006] zu relativ geringen Preisen erhältlich“, was die Wirtschaftlichkeit des „neuen Rückgewinnungsverfahrens deutlich einschränkt.“ (BORMANN et al., 2006, S.75)

Als Rückgewinnungsverfahren zur Aufbereitung des Kondensats kann eine fraktionierte Destillation, ein übliches Verfahren für die Abtrennung von Holzölen bei der Sulfatbleiche, eingesetzt werden (BORMANN et al. 2002, S. 58-59). Darüber hinaus führt die folgende Verfahrenskombination zu einer verbesserten Auftrennung des Extrakt-Gemisches:

- Abscheidung von Öltröpfchen mittels Leichtstoffabscheider und Einsatz von Zentrifugen
- Vakuumdestillation oder Selektives Membrantrennverfahren (Pervaporation)

Auch im Presswasser von Hackschnitzeln ist mit Extraktstoffen in holzart-spezifischer Zusammensetzung zu rechnen, was gaschromatographische und massenspektrometrische Analysen bestätigen konnten (Tabelle 36).

Im Gegensatz zur Gewinnung der Holz-Extraktstoffe durch eine Kreisgastrocknung werden die Holzinhaltsstoffe im Presswasser ohne Einsatz hoher Temperaturen gewonnen, die Gefahr vom „Cracken der flüchtigen Holzinhaltsstoffe“ (BORMANN et al., 2006, S.74) und die damit verbundene olfaktorische Qualitätsminderung bestehen hier nicht.

Allerdings war die Aufbereitung des Presswassers zur Gewinnung der einzelnen Holzextraktstoffe nicht Gegenstand des Forschungsprojektes InnoDry. Die gaschromatographische (GC) Auftrennung und massenspektrometrische (MS) Analyse (das sog. GC-MS-Screening) der einzelnen Presswasser diente zur Identifikation organischer Verbindungen und damit der Abschätzung des Potentials für eine stoffliche Verwertung.

## **2.15 Empirische Erfahrungen mit mechanischen Trocknungsverfahren**

Erste Erfahrungen mit mechanischen Trocknungsverfahren wurden in den USA durch HAYGREEN (1981 u. 1982) sowie LIU & HAYGREEN (1985) gemacht. Auch in Japan wurden in den letzten Jahren Ergebnisse gesammelt. ADACHI et al. (2004) führte dabei erste Versuche mit der Furnierholztrocknung mittels Walzenpresse durch. YOSHIDA et al. (2010) beschreibt drauffolgend ein kontinuierliches Trocknungsverfahren für Hackschnitzel.

Das Verfahren arbeitet mit einem mechanischen Trocknungsschritt durch Pressung und einem anschließenden thermischen Verfahrensschritt.

Drei Weichholzarten Japanische Zeder (*Cryptomeria japonica* D. Don), Japanische Rotkiefer (*Pinus densiflora*), Hinoki Scheinzypresse (*Chamaecyparis obtusa*) sowie eine Hartholzart Japanische Eiche (*Quercus spec.*) wurden als Versuchsobjekte getrocknet.

Im Ergebnis wurde die Holzfeuchte der Hackschnitzel durch den mechanischen Verfahrensschritt von 100 – 270% auf 85 – 130% gesenkt. Dies entspricht einem maximal erreichten Wassergehalt von ca. 45% (vgl. Tabelle 20). Bei der Kombination von mechanischer und thermischer Trocknung soll eine Feuchte von < 20% erreicht worden sein. Bei diesem Ergebnis wurde nur 50% der in thermischen Verfahren verbrauchten Energie benötigt. :

Das Feuchtespektrum des getrockneten Hackguts schwankte dabei sehr. Die Durchsatzleistung des Prototyps liegt im mechanischen Pressvorgang bei max. 0,4m<sup>3</sup>/h.

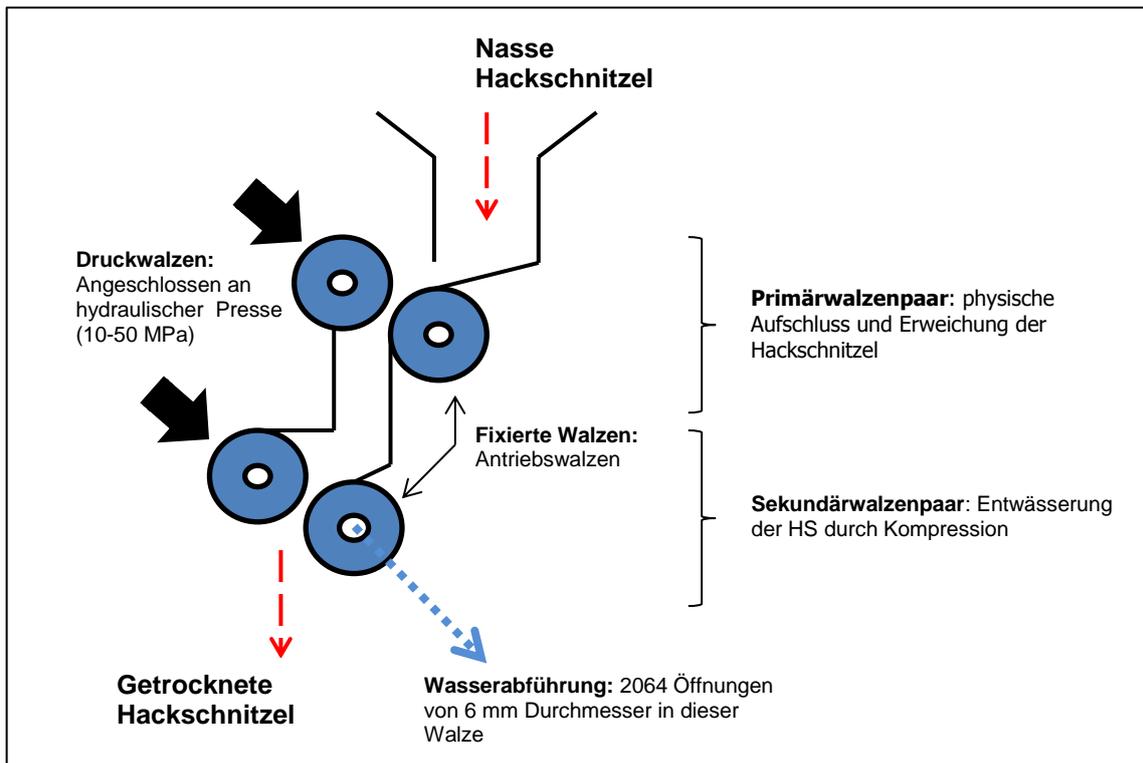
**Tabelle 20:** Feuchte von unbehandelten und getrockneten Hackschnitzel (nach YOSHIDA et al., 2010)

	Zeder		Kiefer	Zypresse	Eiche
<b>Druck in MPa</b>	20	30	20	20	20
<b>Unbehandelt Feuchtigkeits-%</b>	206	197	121	156	90
<b>Getrocknet Feuchtigkeits-%</b>	107	103	100	95	80
<b>Probenverlust während der Trocknung in %</b>	5	1	9	6	10

Die Zeder wies eine ca. 100%-Feuchteabsenkung auf. Dies bedeutet, dass nach der mech. Trocknung noch ein 50% Wassergehalt vorlag. Die Erhöhung des Druckes von 20 auf 30 MPa verbessert den dabei Trocknungserfolg nicht. Bei der Kiefer (*Pinus densiflora*) und Eiche (*Quercus spec.*) wurde eine Feuchteabsenkung von 10-20% erreicht. Etwa 100% Feuchte, d.h. 50% Wassergehalt scheint hier den max. Trocknungsgrad darzustellen.

Der Aufbau der Apparatur besteht aus 2 Walzenpaaren (Primärwalzen, Sekundärwalzen), welche untereinander angeordnet sind. Die Primärwalzen schließen den Hackschnitzel physisch auf und erweichen diesen. Im zweiten Walzengang finden die Entwässerung sowie die Abführung des Wassers statt (vgl. Abbildung 38).

Die oberen Rollen (linke Seite des Primär- und Sekundärwalzenpaares) sind mit einer hydraulisch angetriebenen Presse verbunden. Die unteren Rollen (rechte Seite beider Walzenpaare) sind an einen Motor für den nötigen Antrieb angeschlossen. Die rechte Rolle des zweiten Walzenpaares dient der Wasserabscheidung. Es hat 2064 Öffnungen mit einem Durchmesser von 6 mm. Die durchschnittliche Leistung für dieses System, einschließlich der Absauganlage, liegt bei 3 kW.



**Abbildung 38:** Schema der Trocknungsapparatur (nach YOSHIDA et al., 2010)

Die Umlaufgeschwindigkeit der Walzen beeinflusste dabei die Entwässerungsleistung stärker als der Pressdruck. Mit abnehmender Umlaufgeschwindigkeit (ab 3,7 m/min abnehmend und bei 20 - 30 MPa Pressdruck) steigt gleichermaßen der Trocknungserfolg, bzw. wurde der Wassergehalt abgesenkt. Bei steigender Umlaufgeschwindigkeit (ab 3,7 m/min u. 20 – 30 MPa Pressdruck) steigt der Wassergehalt der Hackschnitzel nach Trocknung an. Eine längere Pressphase wirkte sich somit positiv auf den Trocknungserfolg aus. Ein Pressdruck von 10 MPa reichte nicht aus um signifikante Unterschiede im Trocknungserfolg in Abhängigkeit zur Umlaufgeschwindigkeit zu liefern. Der prozentuale Trocknungserfolg steigt mit zunehmendem Wassergehalt des Ausgangsmaterials.

Es wurden keine signifikanten Veränderungen der Größenverteilung der Hackschnitzel nach der Pressung beobachtet.

Das Volumen der Zeder hat nach der Pressung abgenommen, was zu einer erhöhten Schüttdichte führte. Bei Eiche finden hingegen keine Veränderungen statt. Es wird vermutet, dass dies an der niedrigeren Rohdichte der Zeder (0,35 g/cm<sup>3</sup>) im Vergleich zur Eiche (0,73 g/cm<sup>3</sup>) liegt.

Der Stromverbrauch, der für den mechanischen Trocknungsschritt benötigt wird, bewegt sich zwischen 274 - 3260 kJ/kg Wasser.

	Anpressdruck [MPa]	Energieverbrauch / kg Wasser [kJ]
<b>Zeder</b>	20	274
	30	385
<b>Zypresse</b>		408

Bei Zedern-Hackschnitzel war der Energieverbrauch bei 30 MPa im Vergleich zu 20 MPa Anpressdruck um 40% höher. Die Wassergehaltsabsenkung war jedoch dieselbe.

Der Energieverbrauch des kombinierten Trocknungsverfahrens (mechanisch und thermisch) zur Feuchteabsenkung bei den Zedernhackgut (*Cryptomeria japonica* D. Don) liegt dabei bei 50-60% (power consumption basis) und 60-70% (primary energy basis) einer konventionellen thermischen Trocknung.

Um einen Wassergehalt unter 20% zu erreichen ist ein zusätzlicher thermischer (konventioneller) Trocknungsschritt nötig. Um diesen Wassergehalt zu erreichen, wurde der Energieverbrauch des kombinierten Trocknungsverfahrens mit dem des konventionellen (rein thermischen) Verfahrens verglichen.

Der Energieverbrauch des kombinierten Verfahrens im Vergleich zum thermischen Verfahren bei Wassergehaltsabsenkung unter 20% lag bei Zeder bei 49% (20 MPa), 53% (30 MPa), sowie bei der Zypresse bei 58% und bei der Rotkiefer bei 85%.

Weitere labortechnische Ergebnisse von LAURILA et al. (2014) zeigen ebenfalls deutliche Reduktionsraten des Wassergehalts bei Sägemehlen von Kiefer (*Pinus sylvestris*) Fichte (*Picea abies*) und Birke (*Betula pubescens*). Bei Pressdrücken zwischen 6-38 MPa konnte der Wassergehalt auf bis zu 30% reduziert werden. Dabei hatte die Höhe des Druckes einen größeren Effekt auf das Resultat als die Verweildauer in der Presszone. Das statische Verfahren zeigte bei den Nadelbaumarten Fichte und Kiefer die höchsten Reduktionswerte (25 / 24 Prozentpunkte). Der Energieverbrauch pro kg Wasser lag dabei bei 11 kJ/kg bei Kiefer und 9,7 kJ bei Fichte sowie 41 kJ bei Birke.

### 3 Methodisches Vorgehen

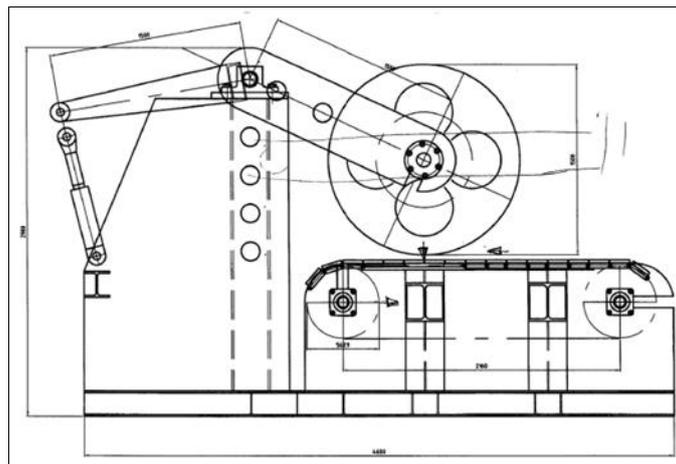
#### 3.1 Anlagenentwicklung

##### 3.1.1 Entwicklung der mechanische Trocknung

Angestrebt wird ein möglichst hoher Entwässerungsgrad des Trocknungsgutes Hackgut, da mit steigender Leistung der mechanischen Trocknung mit einer Steigerung der Effizienz sowie Wirtschaftlichkeit des Trocknungsverfahrens zu rechnen ist. Es ist aufgrund der bisherigen Erkenntnisse aus der im oben Abschnitt genannten Literatur davon auszugehen, dass ein Wassergehalt von 35% durch die mechanische Trocknungseinheit nicht unterschritten werden kann. Dabei kann durch die physikalischen Grundvoraussetzungen lediglich das in den Zellzwischenräumen frei vorliegende Wasser durch den Pressvorgang entfernt werden. Chemisch oder das stärker physikalisch gebundene Wasser ist dabei durch den Pressvorgang nicht entfernbar und potenziell über ein nachgeschaltetes thermisches Nachtrocknungsverfahren zu verringern.

##### 3.1.2 Konzeptionierung des Prototyps und Auswahl des Trocknungsmaterials

Am Beginn der Entwicklung stand dabei die grundlegende Überlegung wie der benötigte Druck mit geeigneten Mitteln auf das Trockengut aufgebracht werden kann. Dabei wurden durch alle Beteiligten die bisherigen Erfahrungen mit mechanischen Presstechniken im europäischen Bereich zusammengetragen und diskutiert. Daneben wurde überlegt, welche SNP für die Trocknung mit dem zu entwickelnden Verfahren in Frage kommen würden. Es wurde entschieden, dass hierfür vorwiegend Hackgutsortimente der beteiligten Säger in Frage kommen, da sich diese hinsichtlich der auftretenden physikalischen Kräfte am besten eignen sowie hinsichtlich der weiteren Rahmenbedingungen wie Verfügbarkeit und mengenmäßiger Anfall am besten eignen.



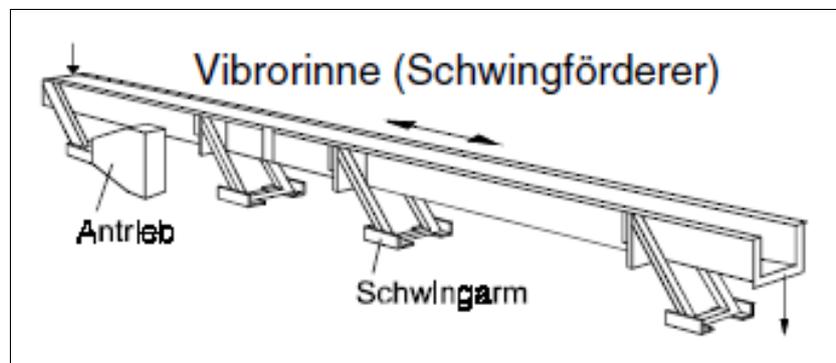
**Abbildung 39:** Erster Prototyp mechanische Trocknungseinheit (InnoDry, 2011)

Auf der Basis der bisherigen Erkenntnisse wurde eine erste Konzeptzeichnung entwickelt. Wie oberhalb in Abbildung 39 dargestellt, enthält der Entwurf eines möglichen ersten Prototyps, bereits wesentliche Elemente, die für die mechanische Presse notwendig sind.

Dabei stehen sowohl die für die Materialzuführung notwendige kettengetriebene Vorschubeinrichtung, als auch ein variables Presssystem in Walzenform mit entsprechender Verankerung im Vordergrund.

### 3.1.3 Materialförderung

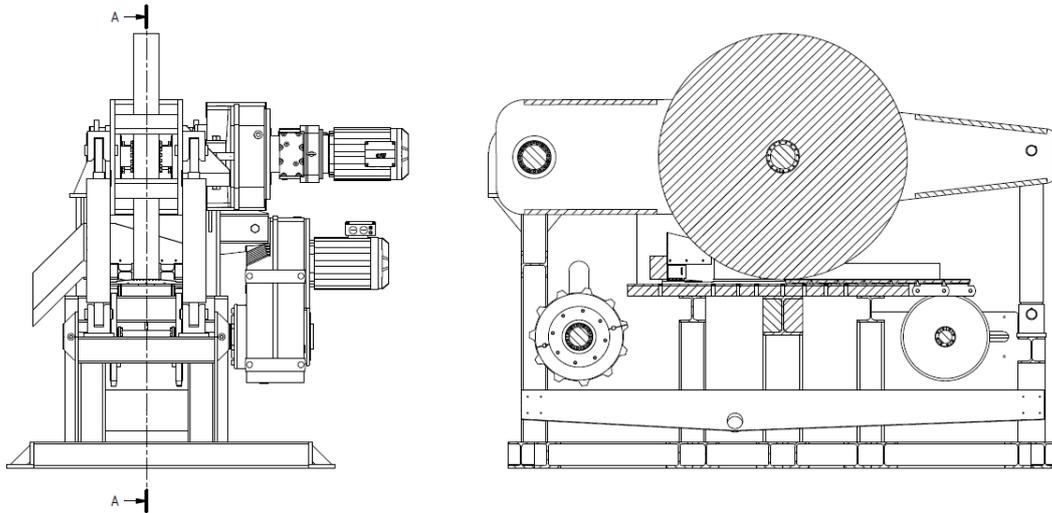
Die Materialförderung des Trocknungsguts Holzhackschnitzel zur mechanischen Trocknungseinheit erfolgt über eine Vibrorinne (vgl. Abbildung 40). Neben einer je nach Geschwindigkeit wählbaren Förderleistung bewirkt die Vibrorinne eine Vergleichmäßigung des Stoffstromes. Eine gleichmäßige Lage des Trockengutes ist wichtige Voraussetzung für eine effiziente mechanische Trocknung. Ferner sind Vibrorinnen wartungsarm, leicht zu reinigen sowie einfach in die internen Betriebsabläufe wie z.B. Materialtransporttechniken zu integrieren.



**Abbildung 40:** Vibrorinne (FNR, 2007, S. 116)

### 3.1.4 Entwicklung des Prototyps

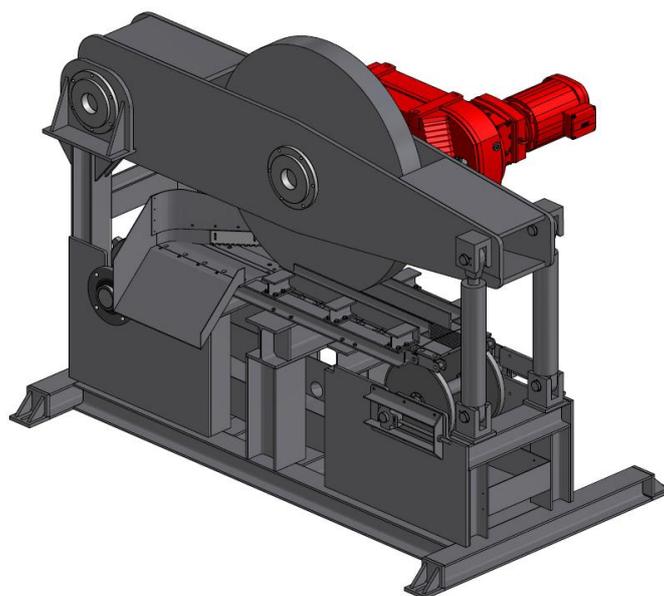
Innerhalb des nächsten Schrittes wurden die gewonnenen Erkenntnisse und Konzepte in einen ersten umsetzungsorientierten Entwurf weiterentwickelt und erste Konstruktionszeichnungen, die unterhalb in Abbildung 41 abgebildet sind, angefertigt. Dabei sind bereits die konstruktiven Elemente wie Materialabstreifer für Förderkette, Wasserabscheidung, Führungseinrichtung für Hackschnitzel während des Pressvorganges enthalten. Dabei erfolgt die Druckaufbringung zu diesem Zeitpunkt auf einem Einwalzensystem, das unterhalb durch einen Kettenführung ergänzt wurde und über ein Hydrauliksystem hinsichtlich des Druckniveaus regelbar geplant war. Der Vortrieb sollte durch zwei entsprechend dem Leitungsniveau dimensionierte elektrische Antriebsaggregate realisiert werden.



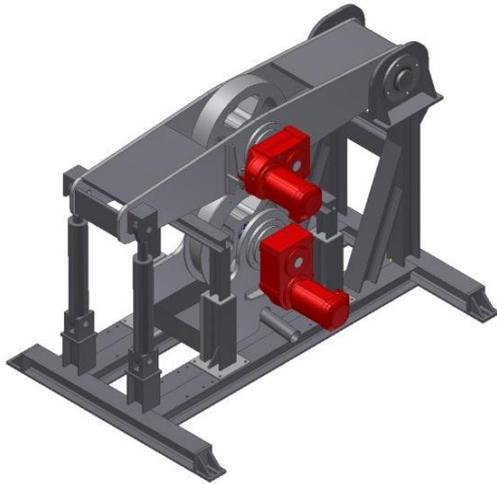
**Abbildung 41:** Erste Konstruktionszeichnung: Front- und Seitenansicht des mechanischen Presssystems mit Kettenförderung (InnoDry, 2011)

Für die Anfertigung der Konstruktionszeichnung wurden verschiedene Parameter berücksichtigt. Dabei spielen die homogene Hackgutzuführen, eine effektive Entwässerungsmöglichkeit, die Verweildauer der Hackschnitzel unter Druckeinwirkung, Druckniveau sowie Effizienz der Wasserableitung bereits eine entscheidende Rolle.

Die unten abgebildete Darstellung (Abbildung 42) zeigt die CAD (Computer-Aided Design) Entwicklung auf Basis der Konstruktionszeichnungen.



**Abbildung 42:** CAD-Darstellung des Prototyps mit Antriebsaggregat (rot) (InnoDry, 2011)



**Abbildung 43:** CAD-Darstellung des weiter entwickelten Prototypen mit Antriebsaggregaten (rot) (InnoDry 2011)

Nach einer ausführlichen technischen Diskussion aller Partner anhand von Skizzen, Entwürfen und Berechnungen (technisch und wirtschaftlich) wurde der bisherige Konstruktionsentwurf abgeändert. Grundlagen für die Änderungen waren Berechnungen hinsichtlich der Marktfähigkeit, da aufgrund der hohen Reibungskräfte, Drücke und Drehmomente mit hohen Energiekosten für die Antriebe zu rechnen wären (siehe Abbildung 43).

Dabei wurde das Einwalzensystem in ein System mit zwei vertikal ausgerichteten Walzen abgeändert. Die Zuführung des Hackgutes sollte zunächst allein mittels einer Vibrorinne und zunächst ohne Kettenzuführung erfolgen. Beidseitig aufschraubbare Seitenteile an der oberen Walze dienen der seitlichen Begrenzung. Mit einem Drehmoment von 12 U/min, 30 U/min und 191 kNm könnte gerechnet werden.

Um sich die Option einer Kettenzuführung offen zu halten, musste eine der beiden Rollenachsen horizontal verschiebbar sein. Der Prototyp sollte generell für eine Plattenkette zur Materialzuführung auf die ebenen und ggf. nachprofilierten Walzen ausgelegt werden, sollte zunächst aber nur mit einer Vibrorinne ausgestattet sein. Hinter beiden Rollen streifen Abweiserbleche das anhaftende Material ab.

Das Presswasser sollte möglichst gesteuert abgeführt werden. Dazu wurde über gewölbte Walzen nachgedacht. Zunächst wird der Prototyp aber mit ebenen Walzen ausgestattet.

### 3.1.5 Bau des Prototyps und erste experimentelle Erfahrungen

Der Bau des Prototyps wurde auf Basis der veränderten Konstruktionspläne begonnen. Dabei wurde als ersten Schritt der Rahmen der Presse angefertigt und darauf um Walzen und Antriebsaggregate, Hydrauliksystem und Systemsteuerungselemente ergänzt.

Die Zuführung des Hackgutes erfolgte über eine Vibrorinne ohne Plattenkettenzuführung für das Hackgut.



**Abbildung 44:** Hackgut nach Verlassen der Presszone (FOCKE, 2012)

Bereits die ersten Pressungen von waldfrischen Nadelholzhackschnitteln mit der Pilotanlage zeigten, dass sich sowohl der Einzug des über die Vibrorinne aufgebenden Materials, also auch die Entfernung des Presswassers als äußerst schwierig erwies. Insgesamt stellt die Abführung des Presswassers eine Herausforderung dar, da mitgeführtes Presswasser nach dem Walzendurchgang entweder sofort wieder von den gepressten Hackschnitteln aufgesogen wurde oder durch den Abstreifer hinter der Walze direkt im Auffanggefäß für die gepressten Hackschnitteln lief.

Um dennoch erste Aussagen über die theoretischen Kapazitäten des mechanischen Pressverfahrens an sich und erste Erkenntnisse über die Inhaltsstoffe des Presswassers treffen zu können, wurden Hackschnitteln durch viermalige manuelle, statische Pressung an einem Versuchsstand mit Zylinderdurchmesser von 87 mm und einer Höhe von 200 mm gewonnen (siehe Abbildung 46 & Abbildung 47).



**Abbildung 45:** Zuführung des Hackgutes über Vibrorinne (FOCKE, 2012)



**Abbildung 47:** Statischer Pressversuch mit mechanischer Presse auf geriffelter Oberfläche (FOCKE, 2012)



**Abbildung 46:** Statischer Pressversuch mit mechanischer Presse auf glatter Oberfläche (FOCKE, 2012)

Parallel zur Presswasseranalytik vor Ort wurden verschiedene Parameter und Einstellungen an der Pilotanlage verändert (Walzendrehzahl 20 Hz und 5 Hz, Laufgeschwindigkeit).

Die gepressten Hackschnitzel aller Versuche (siehe Tabelle 21) wurden separat in dicht abschließbaren Plastikbehälter geben, um diese später im Labor der HFR analysieren zu können.

Außerdem konnten einige Milliliter Presswasser gewonnen werden, die gekühlt für die chemische Untersuchung dem Labor der HFR zugeführt wurden.

**Tabelle 21:** Beschreibung der experimentellen Versuchsreihe

Ausgangsmaterial	Zustand
Probe 1	Waldfrisches Nadelholzhackgut mit Rinde
Probe 2	Waldfrisches Nadelholzhackgut mit Rinde
Ausgangsmaterial	Versuchsstellung
Probe 1	Statischer Pressversuch im Zylinder mit geriffelter Metallgrundplatte (Material aus Zylinderposition <b>oben</b> )
Probe 1	Statischer Pressversuch im Zylinder mit geriffelter Metallgrundplatte (Material aus Zylinderposition <b>Mitte</b> )
Probe 1	Statischer Pressversuch im Zylinder mit geriffelter Metallgrundplatte (Material aus Zylinderposition <b>unten</b> )
Probe 1	Statischer Pressversuch im Zylinder mit glatter Metallplatte
Probe 2	Prototyp Pressversuch mit <b>höherer</b> Walzendrehzahl und händischer Beschickung
Probe 2	Prototyp Pressversuch mit <b>niedriger</b> Walzendrehzahl und händischer Beschickung

Insgesamt kristallisierten sich 3 Problemfelder heraus:

- Zuführung der Hackschnitzel mittels Zuführungsplattenkette
- Antrieb, Getriebe und Geschwindigkeit
- Presswasserabführung

### 3.2 Anlagenerprobung

Die Probeläufe erfolgten im Sägewerk Bohnert durchgeführt und durch das Entwicklungsteam der Firma Bohnert maßgeblich unterstützt.

#### 3.2.1 Durchführung Vorversuche (Teil 1)

Ziel der Vorversuche war es, die Funktionalität und Effizienz des Prototyps nach Abschluss der Optimierungsphase nachzuweisen. Des Weiteren sollten durch den Betrieb der Anlage Fehlerquellen identifiziert und die Funktionalität verbessert werden. Dabei kam ein etwa ein Meter langer Kettenabschnitt zum Einsatz, der die Funktionalität der Plattenkette in Hinsicht auf Materialführung, als auch in Bezug auf die Presswasserableitung nachweisen sollte.

Im Rahmen des Vorversuches, wurde auf dem Plattenkettenabschnitt ein Hackgutteppich aufgetragen), der dann über die Walzen in die Presszone eingeführt wurde. Nach dem

Pressvorgang wurde die Kette durch Umkehrung der Walzendrehung wieder aus der Presszone entfernt. Dieser Vorgang wurde mehrfach wiederholt, anschließend eine repräsentative Mischprobe entnommen, die zusammen mit einer repräsentativen Nullprobe (Ausgangsmaterial) später im Labor analysiert wurde.

Zusätzlich wurde ein Versuch ohne Plattenkette durchgeführt, wobei das Material über eine Blechführung in die Presszone eingeführt wurde. Insgesamt wurden zwei verschiedene Ausgangsmaterialien sowie unterschiedlich hohe Druckniveaus in der der Presse untersucht (siehe Tabelle 22 und Abbildung 48).

**Tabelle 22:** Beschreibung der untersuchten Varianten im Vorversuch (Teil 1)

Ausgangsmaterial	Zustand
Probe 1	Angetrocknetes Nadelholzhackgut mit Rinde
Probe 2	Waldfrisches Nadelholzhackgut mit Rinde
Ausgangsmaterial	Druckniveau
Probe 1	42 bar
Probe 2	42 bar
Probe 2	52 bar
Probe 2	62 bar
Probe 2	72 bar
Probe 2	Einzug über Blech nicht über Plattenkette



**Abbildung 48:** Material nach (links) und vor der Pressung (rechts) (FOCKE 2013)

### 3.2.2 Durchführung Vorversuche (Teil 2)

Nach dem ersten Vorversuch wurde die Funktionalität des Prototyps in Kombination mit der Plattenkette nachgewiesen. In Folge dessen wurde diese als umlaufende Plattenkette nachgerüstet und ins System integriert. Die Zuführung des Pressmaterials erfolgt ab nun über eine Vibrorinne, die das Material mit konstanten Vorschub in die Presszone zuführt (vgl. Abbildung 49).



**Abbildung 49:** Zuführung des Hackgutes über die Vibrorinne auf die durchgehende Plattenkette (FOCKE, 2013)

Im Vordergrund dieses Versuchs stand daher nun der Nachweis der Funktionalität der jetzt im Umlauf betriebenen Plattenkette mit Beschickung durch die Vibrorinne bei verschiedenen Druckniveaus sowie der Vergleich der Effizienz des Presssystems bei waldfrischem sowie vorgelagerten bzw. angetrocknetem Material. Ebenfalls wurde in einem Versuch die obere Antriebskette nicht verwendet, um die Funktion einer nur mitlaufenden oberen Walze zu untersuchen. Für die Versuchsstellung vgl. Tabelle 23.

**Tabelle 23:** Beschreibung der untersuchten Varianten im Vorversuch (Teil 2)

Ausgangsmaterial	Zustand
Probe 1	Angetrocknetes Nadelholzhackgut mit Rinde
Probe 2	Waldfrisches Nadelholzhackgut mit Rinde
Ausgangsmaterial	Druckniveau/Versuchsstellung
Probe 1	62 bar
Probe 2	62 bar mit entfernter oberer Kette
Probe 2	62 bar

### 3.2.3 Durchführung Vorversuche (Teil 3)

Als abschließende Vorversuchsreihe vor einer umfangreichen Hauptmessreihe mit verschiedenen Holzarten und Einstellung war es notwendig, vorab eine möglichst optimale Einstellung für das Gesamtsystem aus Presse und dem Zuführungssystem Vibrorinne zu identifizieren. Dabei stand dieser Vorversuch (Teil 3) im Kontext der Verbindung von maximal möglichem Durchsatz an Hackgut sowie maximal möglicher Effizienz durch einen möglichst hohen Wasserentzug.

Festzulegende Stellgrößen waren hierbei:



**Abbildung 50:** Homogenisierte Einzelprobe von 121 l (FOCKE, 2013)

- **Schütthöhe auf der Vibrorinne**
- **Vorlaufgeschwindigkeit der Vibrorinne**
- **Drehzahl obere und untere Walze**
- **Festlegung der Materialdurchsatzmenge je Durchlauf**

Dabei wurden folgende Versuchsvarianten untersucht.

**Tabelle 24:** Beschreibung der untersuchten Varianten im Vorversuch (Teil 3)

<b>Ausgangsmaterial</b>	<b>Zustand</b>
Probe 1	Waldfrisches Nadelholz mit Rinde (Mischung Fichte & Douglasie)
<b>Ausgangsmaterial</b>	<b>Druckniveau/Versuchsstellung</b>
Probe 1	2 cm Schütthöhe auf Vibrorinne, 60 bar
Probe 1	4 cm Schütthöhe auf Vibrorinne, 60 bar
Probe 1	6 cm Schütthöhe auf Vibrorinne, 60 bar

Bei jedem Durchgang wurde eine homogene Durchschnittsprobe von 121l Hackgut verwendet (siehe Abbildung 50)). Diese Probe wurde durch eine standardisierte Entnahme von Probematerial einer Grundgesamtheit von ca. 100 m<sup>3</sup> großen Hackgutlagers mit frischem Hackgut gewonnen. Dabei wurde die erstellte und durch dreimaliges Durchmischen homogenisierte Basisprobe von rund 400 l Material durch normgerechte manuelle Teilung in die Einzelproben untergliedert. Diese wurden im Folgenden für die einzelnen Pressversuche verwendet.

### 3.3 Durchführung Hauptmessreihe

Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuchsreihe sowie vor dem Hintergrund einer Implementierung des Systems in den laufenden Betrieb der beteiligten Projektpartner wurden folgende Parameter festgelegt.

#### 3.3.1 Baumartenauswahl

Bei der Wahl der zu untersuchenden Baumarten sollten alle Baumarten, die für die beteiligten Sägewerkspartner von Belang sind, oder für andere regionale Anwender potenziell von Interesse sein können, berücksichtigt werden.

Dabei wurde folgende Auswahl festgelegt:

- Fichte (*Picea abies*)
- Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*)
- Kiefer (*Pinus sylvestris*)
- Tanne (*Abies alba*)
- Buche (*Fagus sylvatica*)
- Pappel (*Populus spec.*)

#### 3.3.2 Materialzusammensetzung

Um die maximale Effizienz des Prototyps zu verifizieren, wurden nur frische Hackgutsortimente berücksichtigt. Dabei sollten möglichst durch ein gleiches Hacksystem hergestellte Hackschnitzel verwendet werden. Daher wurden alle Hackschnitzel durch das weitläufig

verwendete Trommelhackersystem (mehrere Hacker) hergestellt und verwendet. Alle Sortimente wurden in Rinde gehackt und teils systembedingt abgesiebt. Alle Sortimente stammen aus regionalen Quellen (vgl. Tabelle 25).

**Tabelle 25:** Verwendeten Sortimente der Hauptmessreihe

Baumart	Herkunft	Hackertyp	Abgesiebt
Fichte	Sägewerk Bohnert	Trommel	ja
Douglasie	Sägewerk Bohnert	Trommel	ja
Kiefer	Sägewerk Schnur	Trommel	ja
Tanne	Sägewerk Bohnert	Trommel	ja
Buche	Firma Fallert	Trommel	nein
Pappel	Firma Fallert	Trommel	nein

### 3.3.3 Anlagenspezifische Parameter der Pressung

Für die Durchführung der Hauptmessreihe wurden variable sowie fixierte Anlagenparameter verwendet. Als variable Parameter wurde der Pressdruck gewählt, um den Wirkungsgrad der Anlage in Bezug auf die physikalischen Qualitätsparameter (wie Wassergehalt, Schüttdichte und weitere) sowie auf die Durchsatzleistungen und Stromverbräuche zu evaluieren (siehe Tabelle 26). Alle anderen Parameter wurden fixiert gewählt, da diese in den Vorversuchen hinsichtlich eines maximalen Durchsatzes bei nachgewiesener Effektivität bestimmt wurden. Abbildung 51 und Abbildung 52 zeigen die Zuführung des Materials in die Presszone sowie den Materialauswurf nach der Pressung



**Abbildung 51:** Durchführung eines Pressdurchganges, Materialzufuhr in die Presszone (FOCKE, 2013)



**Abbildung 52:** Materialauswurf nach der Pressung in der Presszone (FOCKE, 2013)

**Tabelle 26:** Einstellung der Anlagenparameter

Parameter	Einheitsgröße	Werte	Einstellung
Pressdruck	bar	20, 50, 60, 70	variabel
Schütthöhe	cm	6	fixiert
Vorschub Vibrorinne	n/min	711	fixiert
Drehzahl Walze oben	n/min	1500	fixiert
Drehzahl Walze unten	n/min	1454	fixiert
Materialdurchsatz	l	150	fixiert

Für die weiterführenden Analysen und Berechnungen werden die Parameter, die aus dem 150 l Probevolumina stammen, auf einen Srm bzw. einen m<sup>3</sup> hochgerechnet.

### 3.3.4 Physikalische Qualitätsparameter des Hackgutes

Für die Analyse des Trocknungserfolges sowie der Einflüsse der mechanischen Verdichtung auf das Hackgut kommen verschiedene Analyseverfahren zum Einsatz. Dabei wird das untersuchte Material ausgehend der DIN EN 14961-1 charakterisiert.

Die seit Mai 2005 bestehende und aktualisierte europäische Norm für feste Biobrennstoffe wurde durch das Komitee (mit Arbeitsgruppen und Spiegelkomitees) CEN/TC 335 "Solid Bio-fuels" erarbeitet. Innerhalb der Norm werden feste Brennstoffspezifikationen und Klassen beschrieben, jedoch neben Klassifizierungen und Definitionen auch Testverfahren und Vorgehensweisen für die Parametererfassung.

Dabei sind die Qualitätsparameter Wassergehalt, Aschegehalt, Korngrößenverteilung, Schüttdichte, Brenn- und Heizwert von besonderer Bedeutung. Eine Qualitätskontrolle der verwendeten Hackgutsortimente vor sowie nach der Pressung, findet durch die Analyse dieser Parameter statt.

Folgende durch Normen beschriebene Verfahren werden eingesetzt:

- Verfahren zur Probenahme: CEN/TS 14778-1:2011
- Verfahren zur Probenherstellung: EN 14780:2011
- Bestimmung der Schüttdichte: EN 15103:2010
- Bestimmung der Korngrößenverteilung: CEN/TS 15149-1:2010
- Bestimmung des Wassergehaltes: EN 14774-1:2010
- Bestimmung des Energiegehaltes: EN 14918:2009
- Bestimmung des Aschegehaltes: EN 14775:2009

### 3.4 Presswasseranalytik

Presswasser sortenreiner Hackschnitzel mit Rinde wurden durch die mechanische Pressung in dem Prototyp mit Drücken von 20, 50, 60 und 70 bar pro Holzart gewonnen. Um Vorausagen bezüglich der Qualität des Abwassers zu treffen, wurden im Vorversuch charakteristische Abwasserparameter von Presswasser aus Fichten- und Douglasien-Hackschnitzeln im Labor der Hochschule Rottenburg analysiert. Die Ergebnisse liefern erste Erkenntnisse zur Beurteilung der Höhe und Art der Belastung des Presswassers. Eine Auswahl der im Analyselabor zu untersuchenden chemischen Parameter konnte dadurch festgelegt und erste

Aussagen zur Genehmigungfrage für die Direkteinleitung des Presswassers getroffen werden.

Die Untersuchungen der holzsortenrein gewonnenen Presswasser der Hauptmessreihe im Untersuchungszeitraum vom April bis Juni 2013 wurden von einem erfahrenen Analyselabor nach normgerechten Analyseverfahren durchgeführt. Sowohl die Abwasserparameter (Tabelle 28) wie auch die organischen Holzinhaltsstoffe der Presswasser mittels gaschromatographischer Untersuchung wurden dort analysiert.

### 3.4.1 Abwasserparameter

Aufgabe der Abwasserreinigungsanlagen ist die Entfernung von Schmutzstoffen aus dem Abwasser, um die Belastung der Vorfluter (oberirdisches Fließgewässer) durch die Einleitung des gereinigten Abwassers möglichst gering zu halten. Bei diesen Schmutzstoffen handelt es sich um „biologisch abbaubare organische Stoffe (BSB<sub>5</sub>), dann Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), Phosphor (P), Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)“ (GUJER 2007, S.291-292). Daneben ist der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) „heute eine häufig gebrauchte Größe um die Konzentration der organischen Stoffe im Abwasser (...) zu bestimmen“ (GUJER 2007, S.37). Die Konzentration des CSB entscheidet aber auch über die Genehmigung der Abwasserabgabe an eine kommunale Abwasserreinigungsanlage und über die Höhe der Abwassergebühr. Ergänzend kann auch der Kohlenstoffanteil aller organischen Verbindungen, der TOC (engl. Total Organic Carbon) und der Anteil von gesamt gebundenem Stickstoff, der TN<sub>b</sub> (engl. Total Nitrogen bound) als Maß für die Belastung mit Stickstoffverbindungen erfasst werden. (GUJER 2007, S. 39 u. S.42)

Die bisher aufgezählten Abwasserparameter sind neben pH-Wert, Temperatur und Sauerstoffgehalt Gegenstand regelmäßiger Eigenkontrollen (von Zu- und Ablauf) von Abwasseranlagen mit biologischer Reinigungsstufe. (Eigenkontrollverordnung - EKVO 2001, Baden-Württemberg)

Zur Beurteilung der Schädlichkeit von Abwasser dient auch die Bestimmung der Metallgehalte und der Konzentration des Summenparameters für adsorbierbare, organisch gebundene Halogene (AOX). Für diese Abwasser-Parameter liegen sowohl in der Indirekteinleitungsverordnung (IndVO) wie auch in der Abwasserabgabenverordnung und in den Anhängen der Abwasserverordnung Schwellen- und Grenzwerte vor. Im Anhang 13 der Abwasserverordnung (AbwV) für die Herstellung von Holzfaserverleimungen werden Anforderungen für den Phenol-Index gestellt. Aromatische phenolische Substanzen kommen im Holz u.a. als Lignan, als Stilbene und als Gerbstoffe vor, die eine biozide und damit toxische Wirkung besitzen können. (WAGENFÜHR, SCHOLZ 2012, S. 72-73)

Aus diesem Grund wurden für die Presswasser der Phenolindex wie auch die aerobe biologische Abbaubarkeit nach Zahn-Wellens (verkürzter Zahn-Wellens-Test, 7 Tage) gemessen.

Der Zahn-Wellens-Test „wurde ursprünglich entwickelt, um die biologische Abbaubarkeit von wasserlöslichen Chemikalien zu prüfen. Dabei wird eine zu prüfende organische Substanz in Gegenwart von Belebtschlamm (Mikroorganismen) inkubiert.“ (STUCKI 2000, S.663) Die Abbaubarkeit wird als CSB- oder DOC-Abbaubargrad über einen bestimmten Zeitraum (bei verkürztem Test über max. 7 Tage) bestimmt. (Anlage zu §4 AbwV)

Als physikalische Parameter wurden einmalig im Vorversuch die Leitfähigkeit, ein Summenparameter, der Aufschluss über die Menge von im Wasser dissoziierten Salzen, Basen oder Säuren gibt - zum Vergleich, Trink- und Oberflächenwasser haben eine Leitfähigkeit von 100 – 1000 µS/cm (DIN EN 27888:1993-11) – , der Geruch und die Färbung bestimmt.

Soll Abwasser an das kommunale Kanalnetz abgegeben werden, spielen zusätzlich der pH-Wert und die Konzentrationen von Sulfat ( $\text{SO}_4^{3-}$ ) und Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ) eine wichtige Rolle, da diese in hohen Konzentrationen zu Beeinträchtigung bzw. Korrosion des Betons der Abwasserrohre führen. Der Sulfat-Wert wurde einmalig im Vorversuch untersucht.

### 3.4.2 Presswasseranalyse Vorversuche

Drei Stichproben im Umfang von jeweils 500 ml aus der Vorversuchsreihe 3 wurden gewonnen. Dazu wurde das Presswasser erst nach einigen Minuten Laufzeit der Pressung direkt vom Prototyp-Ablauf in PE-Flaschen bis zur vollständigen Füllung aufgefangen. Der Geruch und die Färbung (vgl. Abbildung 53) wurden sofort bestimmt. Direkt am Tag der Probenahme nach dem ca. zweistündigen, gekühlten (mittels Styroporkiste und Eis) Transport wurden die Leitfähigkeit und der pH-Wert gemessen sowie die  $\text{BSB}_5$  - Analyse gestartet. Für die weitere Untersuchung am nächsten Tag wurden die Proben gekühlt über Nacht gelagert. Im HFR-Labor wurden dann der Summenparameter CSB sowie die Konzentrationen von Ammonium, Nitrat, Phosphat, Sulfat und Eisen mit Hilfe der in Tabelle 27 aufgelisteten Methoden bestimmt.

Die Bestimmung der Eisenkonzentration diente der Abschätzung, inwieweit Eisen-Ionen durch den mechanischen Abrieb der Bauteile des Prototyps in das Presswasser übergehen. Der Eisengehalt hat aber keine Auswirkung auf die Beurteilung der Schädlichkeit des Abwassers (Tabelle 45).



**Abbildung 53:** Ablauf des Presswassers im Vorversuch (FOCKE, 2013)

**Tabelle 27:** Messmethoden zur Bestimmung der Abwasserparameter im Vorversuch

Parameter	Messmethode	Messbereich	Normen
<b>Physikalische Parameter:</b>			
Geruch	Intensität und Art		
Färbung	Visuelle Untersuchung		Scheinbare Färbung nach ISO 7887, Verfahren A
Leitfähigkeit	Elektrochemische Widerstands-messung mit Standard-Leitfähigkeitsmesszelle von WTW	1 µS/cm – 2 S/cm	DIN EN 27888: 1993-11
<b>Chemische Parameter:</b>			
BSB <sub>5</sub>	Respirometrische BSB-Messung mit OxiTop IS 6 von WTW	0-200 mg/l, 0-400 mg/l und 0-800 mg/l	Betriebsverfahren nach Eigenkontrollverordnung, DIN 1899-1
CSB	Photometrischer Rundküvettest, Nanocolor CSB 600 und CSB 1500*	50-600 mg/l und 100-1500 mg/l	CSB 1500 nach DIN ISO 15702:2002
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Kolometrische Bestimmung, Viscolor Eco*	0,2-3 mg/l	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Kolometrische Bestimmung, Viscolor Eco*	1-120 mg/l	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Kolometrische Bestimmung, Viscolor Eco*	0,2-5 mg/l	
pH	Elektrochemische Messung mit pH-Elektrode, Labor-pH-Meter von WTW	-2,0 – 20,0	DIN 38404 – C5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Trübungsmessung mit Bariumsulfat, Viscolor Eco*	25-200 mg/l	
Fe <sup>2+/3+</sup>	Kolometrische Bestimmung, Viscolor Eco*	0,04-1,0 mg/l	

\*: von Macherey-Nagel GmbH & Co KG

### 3.4.3 Presswasseranalyse Hauptmessreihe

Im Zeitraum von April bis Juni 2013 wurden in der Hauptmessreihe Hackschnitzel der Holzarten Douglasie, Fichte, Tanne, Kiefer, Pappel und Buche jeweils mit den Drücken von 20, 50, 60 und 70 bar im Prototyp auf dem Gelände des Sägewerks Bohnert in Seebach (Ortenaukreis) gepresst. Nach jeder Holzart wurde die Press-Anlage mit Wasser gereinigt und soweit wie möglich getrocknet. Die Pressversuche mit unterschiedlichen Drücken dienten der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit, der Energiebilanz und der Abhängigkeit der Wassergehaltsreduktion vom Pressdruck.

Pro Pressdruck und Holzart wurden jeweils 150 l Hackschnitzel eingesetzt und im kontinuierlichen Verfahren gepresst. Damit ergaben sich pro Holzart vier Durchläufe.

Zum Zeitpunkt der Abwasserprobenahme konnte noch keine Aussage zum effizientesten und wirtschaftlichsten Druck getroffen werden. Aus diesem Grund sowie aus Kostengründen wurde für die Probenahme pro Holzart eine Mischprobe aus allen vier Press-Durchläufen erstellt und diese zur Analyse nach entsprechender Probenvorbereitung und Konservierung an das Analyselabor geschickt.

Im Probenahmeverfahren für Abwasser nach der Norm DIN 38402–A 11 (Ausgabe Dez. 1995) basiert die Probenahmedauer auf Rechtsvorschriften wie z.B. branchenspezifische Anhänge der Abwasserverordnung (AbwV). In Anlehnung an Anhang 13 der AbwV für Abwasser aus der Herstellung von Holzfaserverplatten ist für die Probenahme eine qualifizierte Stichprobe oder eine 2-Stunden-Mischprobe erforderlich. In der Hauptmessreihe wurden pro Holzart 2-Stunden-Mischproben (Probe aus mehreren Proben innerhalb von 2 Stunden) gewählt, da ein Messdurchgang pro Holzart ca. zwei Stunden dauerte. Das gesamte Presswasser pro Holzart wurde aufgefangen, gemischt und in die vom Analyselabor zur Verfügung gestellten Probenahmegefäße verteilt.

Die Wahl der Probenahmegefäße hängt von der Art der zu analysierenden Abwasserparameter zusammen. Folgende Probenahmegefäße kamen dabei zum Einsatz:

- 1 Liter-PE-Flasche für die Parameter CSB, BSB<sub>5</sub>, TOC
- 500 ml – PE-Flasche für die Parameter NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, TN<sub>b</sub>
- 500 ml – PE-Flasche für den Phenol-Index
- 250 ml – PE-Flasche für die Metalle und P
- Je 1 Liter- Glasflasche (grün) für AOX und die GC-Analyse
- 2 x 1 Liter – PE-Flaschen für den verkürzten Zahn-Wellens-Test

Zur Probenkonservierung fand der Transport in den dafür vorgesehenen, mit Eis gekühlten Styropor-Transportkisten statt. Am Tag der Probenahme wurde der pH-Wert für die Probe der AOX-Bestimmung ermittelt und auf einen pH-Wert < 2,0 mittels Salpetersäure eingestellt. Die Proben für die CSB-, BSB<sub>5</sub>-, TOC-Analyse und für den Zahn-Wellens-Test wurden eingefroren. Alle anderen Proben lagerten im Kühlschrank bei einer Temperatur von ca. 5°C.

Am Folgetag wurden die Proben im Auftrag des Analyselabors abgeholt und zum Labor transportiert. Entsprechend der Anlage zu § 4 AbwV wurden dort die Analyse- und Messverfahren normkonform durchgeführt, wie in Tabelle 28 dargestellt wird.

Zur Identifikation organischer Verbindungen wurden die Presswasser-Proben gaschromatographisch getrennt und massenspektrometrisch analysiert (GC-MS-Screening). Durch Vergleich der erhaltenen Massenspektren mit Spektrenbibliotheken (NIST05, Wiley7) konnten die Signale zugeordnet werden. Die identifizierten Einzelsubstanzen wurden aufgelistet und halbquantitativ ausgewertet.

**Tabelle 28:** Verwendete Analyse- und Messverfahren der Hauptmessreihe

<b>Parameter Abk.</b>	<b>Parameter Bezeichnung</b>	<b>Norm des Analyse- und Messverfahrens</b>
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	DIN EN 1899-1
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	DIN 38409-41
TOC	Organisch gebundener Kohlenstoff, gesamt (Total Organic Carbon)	DIN EN 1484
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff (Dissolved Organic Carbon)	DIN EN 1484
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene	DIN EN 1485, 8.2.2
Phenol-Index	Phenol-Index	DIN 38409-16-1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Ammonium-Stickstoff	DIN EN ISO 11732
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	Nitrat-Stickstoff	DIN EN ISO 10304-1
TN <sub>b</sub>	Gesamter gebundener Stickstoff (Total Nitrogen bound)	DIN EN 12260
Cl <sup>-</sup>	Chlorid	DIN EN ISO 10304-1
P	Phosphor gesamt	DIN EN ISO 11885
Hg	Quecksilber	DIN EN 1483
Pb	Blei	DIN EN ISO 11885
Cd	Cadmium	DIN EN ISO 11885
Cr	Chrom	DIN EN ISO 11885
Cu	Kupfer	DIN EN ISO 11885
Ni	Nickel	DIN EN ISO 11885
Zn	Zink	DIN EN ISO 11885
ZW	Verkürzter Zahn-Wellens-Test, 7 Tage	DIN EN ISO 9888
GC-MS-Screening	Gaschromatographische-Massenspektrometrische Analyse	

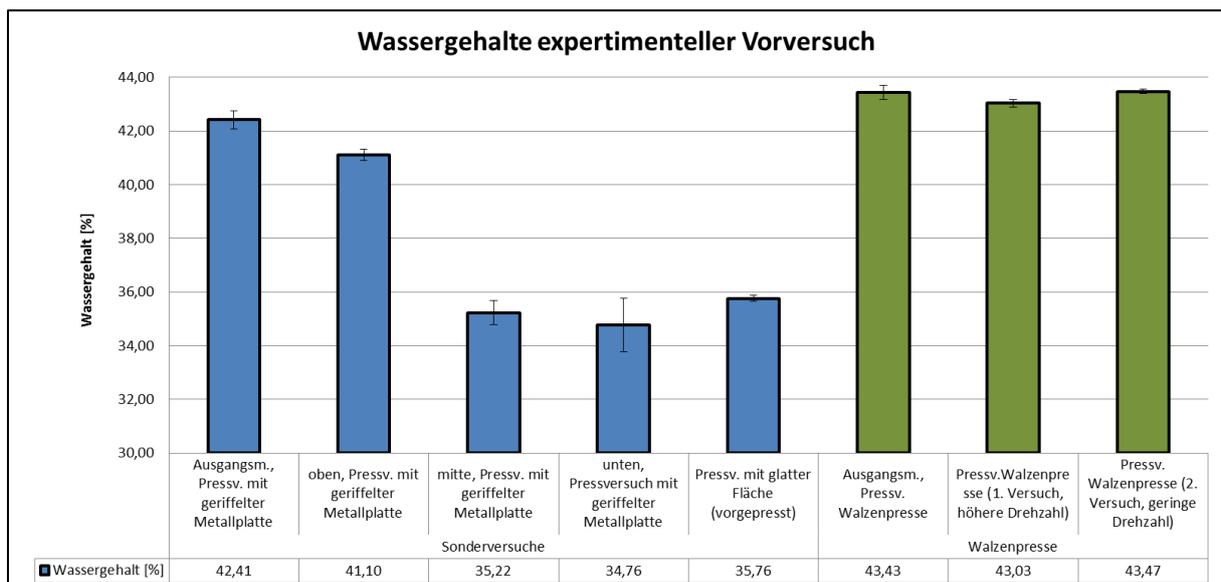
## 4 Ergebnisse der Anlagenerprobung (Experimente, Vorversuche, Hauptmessreihe)

Im Folgenden werden die Ergebnisse aller durchgeführten Untersuchungen in chronologischer Reihenfolge dargestellt.

### 4.1 Experimentelle Vorversuche

Abbildung 54 zeigt die erreichte starke Absenkung des Wassergehaltes im Vergleich zum nassen Ausgangsmaterial (42,4%) bei der Sonderversuchsreihe mit der statischen Presse. Dabei wurden die durchschnittlichen Wassergehalte in den jeweiligen Positionen (oben, Mitte, unten) innerhalb des Presszylinders bestimmt. Zu erkennen war, dass insbesondere ein deutlich geringer Wassergehalt in den mittleren (35,2%) und unteren (34,8%) Lagen resultierten, während die Hackschnitzel in der oberen Position einen nahezu unveränderten Wassergehalt (41,10%) aufgewiesen haben. Ein Pressversuch mit glatter anstatt mit geriffelter Grundplatte ergab einen höheren Endwassergehalt (35,8%)

Die Ergebnisse der Versuche mit Walzenpresse mit händischer Beschickung und ohne Plattenkette weisen hingegen keine signifikant niedrigen Wassergehalte im Vergleich mit dem Ausgangsmaterial auf. Insbesondere konnte hier beobachtet werden, dass hier die einzelnen Hackgutpartikel im Vergleich zum statischen Pressversuch kaum eine Auffaserung bzw. Quetschung aufwiesen und den Pressvorgang nahezu unverändert durchliefen.

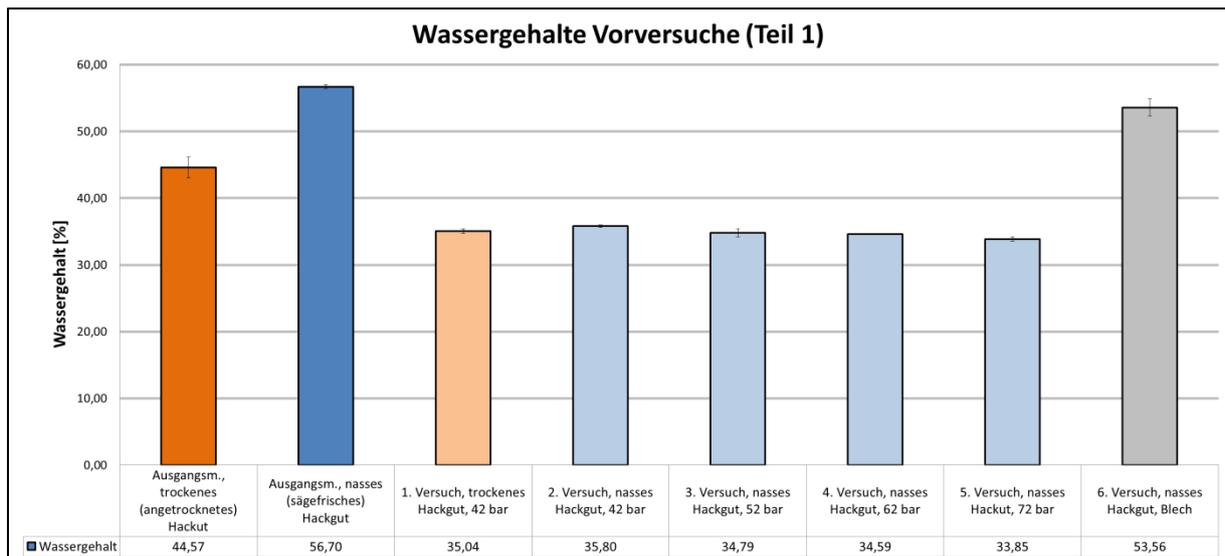


**Abbildung 54:** Entwicklung der Wassergehalte bei der Sonderversuchsreihe sowie der Versuche mit der Walzenpresse

### 4.2 Vorversuch Teil 1

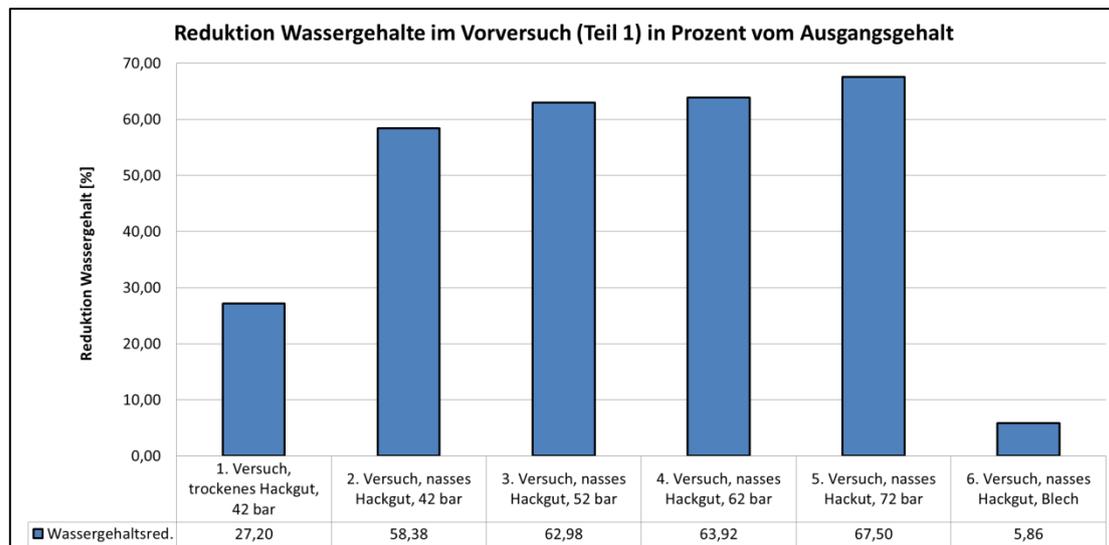
Im ersten Teil der Vorversuchsreihe wurde die statische Plattenkette analysiert.

Dabei wurde sowohl leicht angetrocknetes sowie frisches Hackgut verwendet. Die Ergebnisse in der unteren Abbildung illustrieren den Effekt der Pressung bei unterschiedlichen Druckniveaus.



**Abbildung 55:** Entwicklung der Wassergehalte beim Vorversuch (Teil 1)

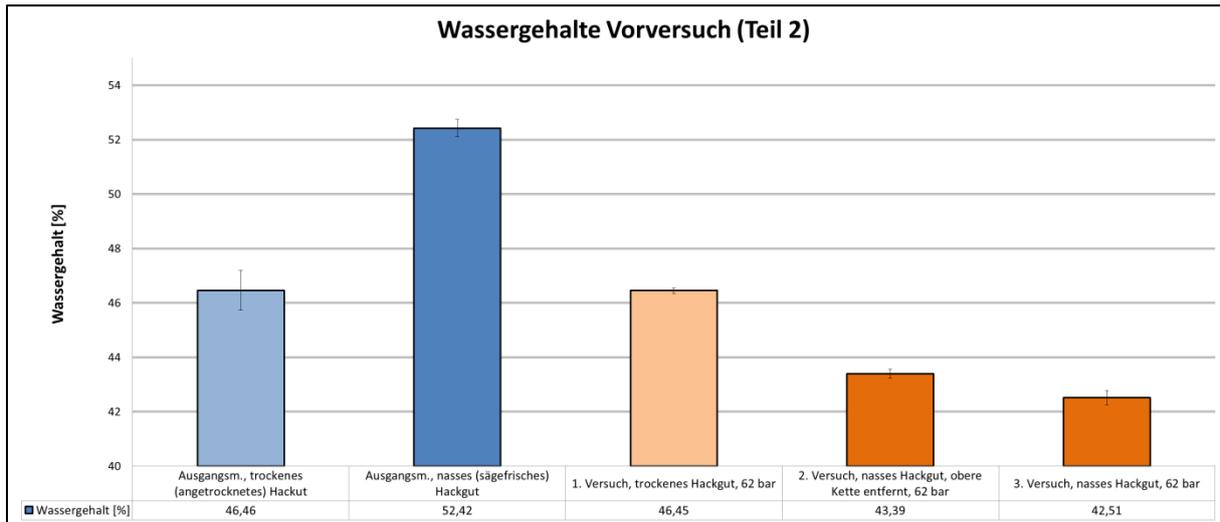
Das angetrocknete Hackgut konnte dabei bei einem Druckniveau der Walzen auf die Plattenkette von 42 bar von 44,6% auf 35,0% abgetrocknet werden. Das nasse Hackgut konnte dabei trotz des höheren Ausgangsniveaus von 56,7% auf ein ähnliches Niveau von 35,8% reduziert werden. Die Aufbringung eines höheren Drucks in den weiteren Versuchen konnte den Wassergehalt moderat weiter absenken. Der niedrigste Wassergehalt wurde bei einem Druckniveau von 72 bar mit 33,9 % gemessen. Die Versuchsreihe ohne den Einsatz eines Bleches anstatt der Plattenkette bei 72 bar konnte zeigen, dass hierdurch lediglich eine marginale Absenkung um einen Absolutwert von ca. 3% möglich war. Die relative prozentuale Effektivität der statischen Plattenkette sowie der Pressung auf Blech zeigt die unten abgebildete Darstellung.



**Abbildung 56:** Darstellung der relativen prozentualen Wassergehaltsabsenkung im Vorversuch (Teil 1)

Im Gegensatz zu den experimentellen Versuchen konnten die Wirksamkeit der Pressung mit Hilfe der Plattenkette auch optisch an den Hackgutpartikeln nachverfolgt werden. Diese wurden stark gepresst, zerfaserten teils stark und hellten sich aufgrund des entzogenen Wassers auf.

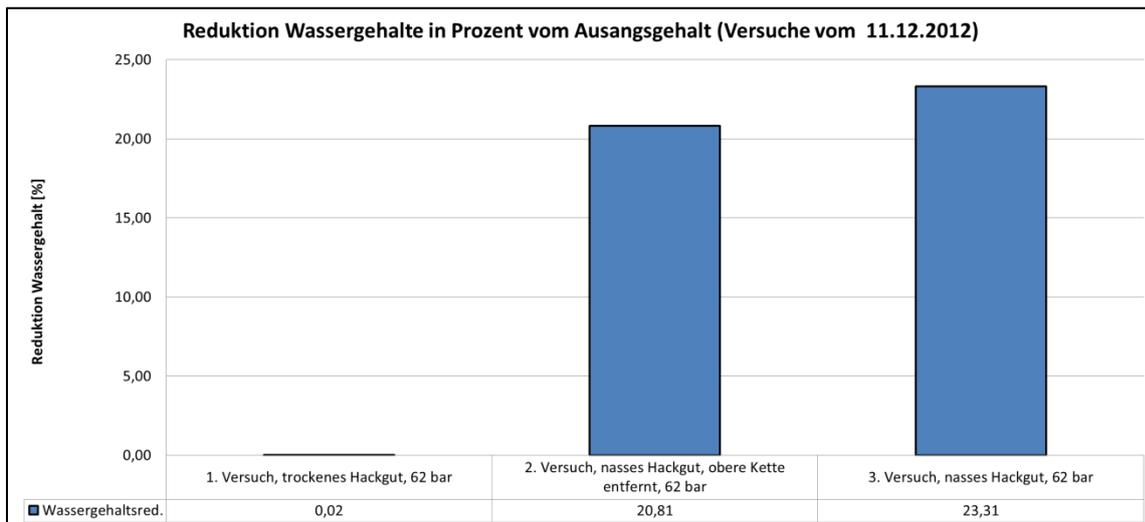
### 4.3 Vorversuch Teil 2



**Abbildung 57:** Darstellung der Entwicklung der Wassergehalte beim Vorversuch (Teil 2)

Wie in der oberen Abbildung zu sehen konnte beim zweiten Vorversuch (durchlaufenden Plattenkette) sowohl beim angetrockneten als auch beim nassen Ausgangsmaterial der Wassergehalt durch den Pressvorgang abgesenkt werden. Dabei war das Niveau der Absenkung jedoch deutlich geringer als beim ersten Vorversuch. Die Absenkung des angetrockneten Ausgangsmaterials war dabei kaum messbar (0,01%) und nicht signifikant. Eine signifikante Absenkung konnte nur beim nassen Ausgangsmaterial von 52,4 auf 42,5% festgestellt werden. Die Entfernung der oberen Antriebskette und damit die Einstellung der oberen Walze auf ein einfaches Mitlaufen während des Pressvorgangs ergaben dabei einen Wassergehalt von 43,4% und waren damit signifikant geringer als mit eigenem Antrieb.

Die untere Abbildung stellt erneut die relative prozentuale Wassergehaltsreduktion des Vorversuchs dar.

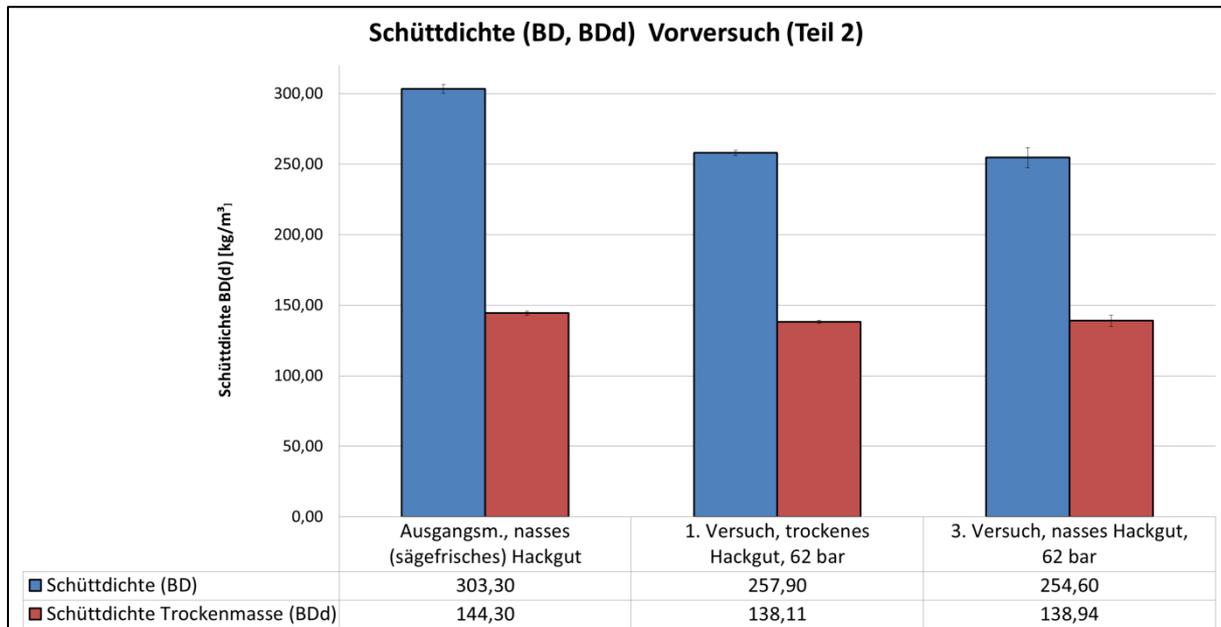


**Abbildung 58:** Darstellung der relativen prozentualen Wassergehaltsabsenkung im Vorversuch (Teil 2)

Neben der Bestimmung der Wassergehalte wurde auch der Einfluss der Pressung auf die Entwicklung der Schüttdichte ermittelt. Dabei wurde sowohl die Schüttdichte mit dem jewei-

gen enthaltenen Wassergehalt von Ausgangsmaterial und Pressmaterial, als auch die Schüttdichte der kalkulatorischen Trockenmasse bestimmt.

Zu erkennen ist dass die wassergehaltsabhängige Schüttdichte (BD) durch den Pressvorgang von 303,3 kg/m<sup>3</sup> auf 257,9 bzw. 253,6 kg/m<sup>3</sup> deutlich abnimmt (Abbildung 59). Die kalkulatorische Schüttdichte der Trockenmasse nimmt zwar ebenfalls ab, jedoch in deutlich geringerem Maße und bleibt im Grunde auf einer vergleichbaren Höhe von rund 140 kg/m<sup>3</sup>.



**Abbildung 59:** Darstellung der Entwicklung der Schüttdichte (BD) sowie der Schüttdichte der Trockenmasse (BDd) im Vorversuch Teil 2

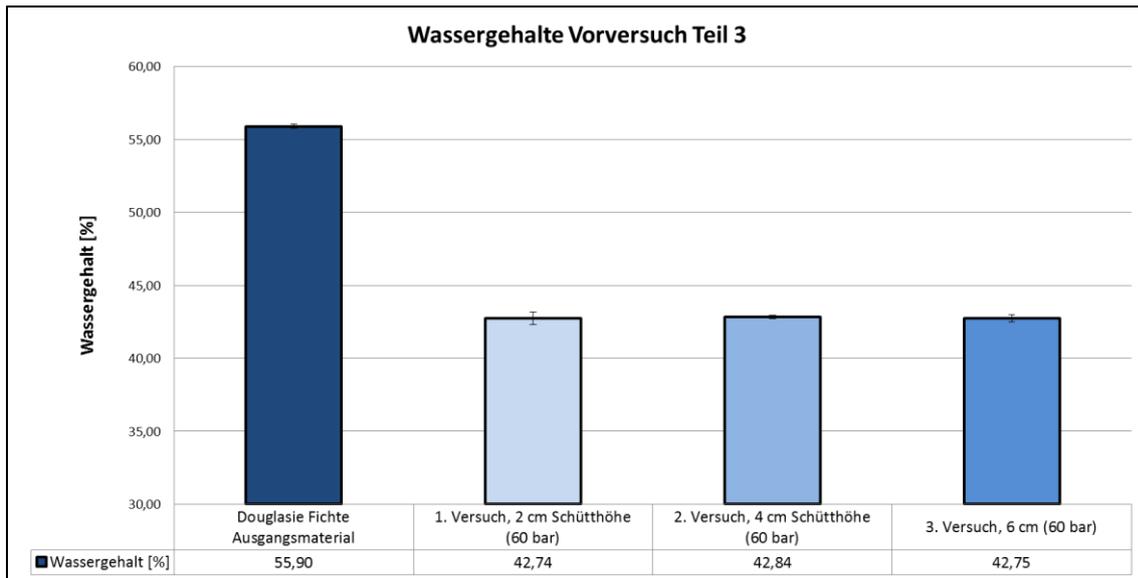
#### 4.4 Vorversuch Teil 3

Der abschließende Vorversuch Teil 3 stellte mit seinen Ergebnissen die Rahmenbedingungen für die Durchführung der späteren Hauptmessreihe und war damit von besonderem Belang.

Im Vordergrund stand hier die Ermittlung des maximalen Durchsatzes mit möglichst effektivem Wassergehaltsentzug durch die Pressung.

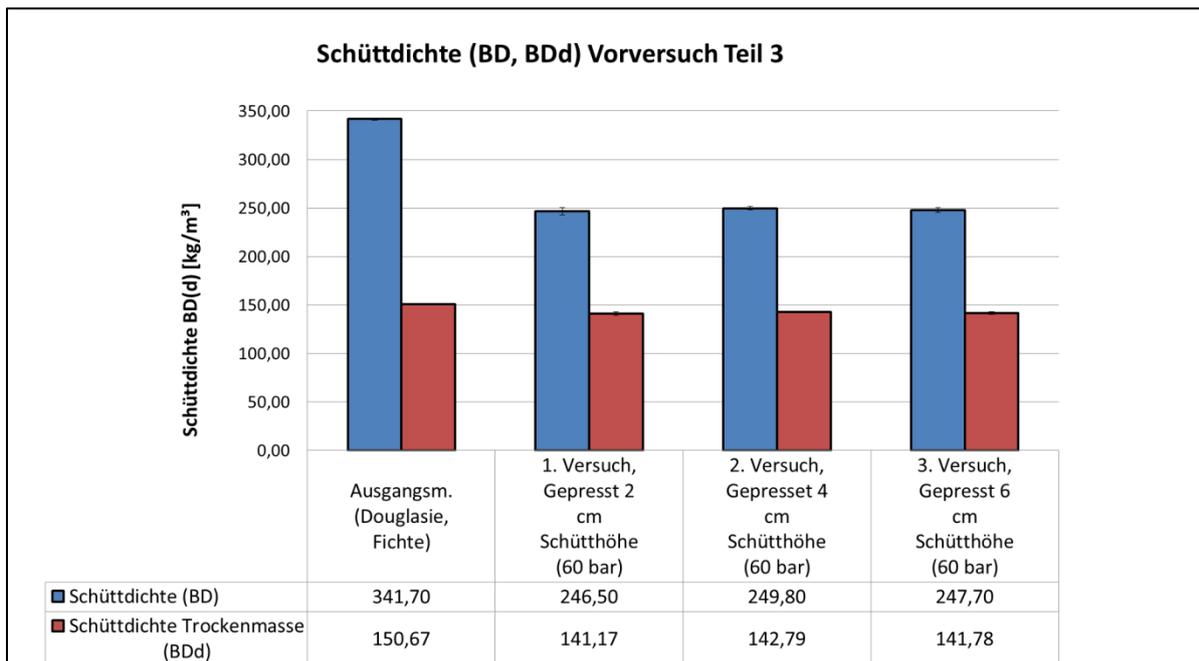
Dabei wurde das Douglasien-Fichten Mischhackgut in definiertem Versuchsvolumen von 121 l in verschiedenen Schütthöhen manuell auf die Vibrorinne aufgetragen.

Die Entwicklung der Wassergehalte je nach Schütthöhe ist in der unteren Abbildung dargestellt.



**Abbildung 60:** Darstellung der Entwicklung der Wassergehalte im Vorversuch Teil 3

Insbesondere wird deutlich, dass trotz unterschiedlicher Schütthöhe auf der Vibrorinne sich der Wassergehalt in den jeweiligen Schütthöhen nur unwesentlich voneinander unterscheidet. Dabei konnte der Wassergehalt insgesamt um absolut ca. 13% reduziert werden, was einem relativen Wert von rund 30,5% entspricht.



**Abbildung 61:** Darstellung der Entwicklung der Schüttdichte (BD) sowie der Schüttdichte der Trockenmasse (BDd) im Vorversuch Teil 3

Die Entwicklung der in Abbildung 61 abgebildeten Schüttdichte zeigt eine starke Reduktion bei der wassergehaltsabhängigen Schüttdichte BD von 342 auf rund 250 kg/m³ für alle drei Schütthöhen. Dabei war keine signifikant unterschiedliche Verteilung in den drei Varianten ablesbar. Die Schüttdichte der Trockenmasse sinkt um rund 10 kg/m³ durch den Pressvorgang mit ebenfalls geringer Variationsbreite.

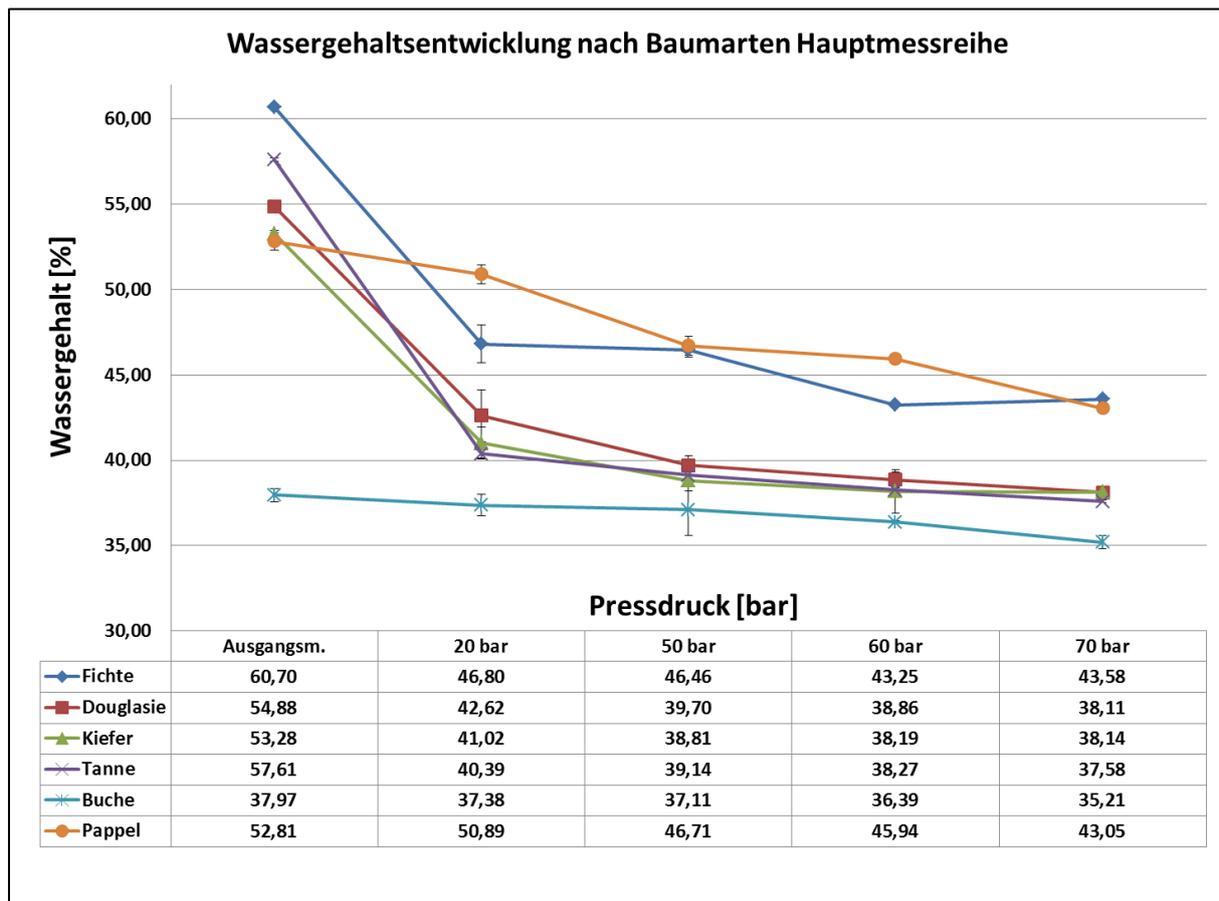
## 4.5 Hauptmessreihe

### 4.5.1 Wassergehaltsentwicklung (EN 14774-1:2010)

Für die im Brennstoff enthaltene nutzbare Energiemenge (Heizwert) ist der Wassergehalt der wichtigste Einflussfaktor. Dabei ist der Heizwert bei einem geringen Wassergehalt entsprechend erhöht, sowie bei einem hohen Wassergehalt in der gleichen Weise verringert.

Die Entwicklung der Endwassergehalte nach der Pressung war direkt vom jeweiligen Druckniveau in der Presszone abhängig. Die in der unteren Abbildung dargestellten Ergebnisse weisen für alle untersuchten Baumarten einen abnehmenden Wassergehalt bei ansteigendem Druck nach. In den meisten Fällen (bis auf Fichte) wird der niedrigste Wassergehalt bei 70 bar erreicht. Den absolut stärksten Reduktionswert wies dabei die Tanne auf, deren Ausgangswassergehalt um über 20% absolut abgesenkt werden konnte. Bei einem relativ geringen Ausgangswert wurde der Wassergehalt von Buche nur sehr geringfügig (2,8%) verringert. Bei Pappel wurde bei ähnlicher Konstellation der Wert um 9,8% abgesenkt.

Allgemein weisen die Nadelhölzer gute Reduktionswerte auf, dabei konnten absolut gesehen



**Abbildung 62:** Entwicklung der Wassergehalte bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten

vor allem bei Tanne (20,0%), Douglasie (16,8%), Fichte (17,1%) sowie Kiefer (16,8%) die Wassergehalte stark abgesenkt werden (vgl. Tabellen unten).

**Tabelle 29:** Entwicklung der absoluten Wassergehaltswerte bei steigendem Pressdruck je nach Baumart

Reduktion absolut zum Ausgangswert Wassergehalt [%] nach Baumart							
Press- druck [bar]		Fichte	Douglasie	Kiefer	Tanne	Buche	Pappel
	20	13,90	12,25	12,26	17,22	0,59	1,92
	50	14,24	15,18	16,06	18,47	0,85	6,11
	60	17,45	16,01	16,69	19,34	1,57	6,87
	70	17,12	16,77	16,73	20,03	2,76	9,76

**Tabelle 30:** Entwicklung der relativen Wassergehaltswerte bei steigendem Pressdruck je nach Baumart

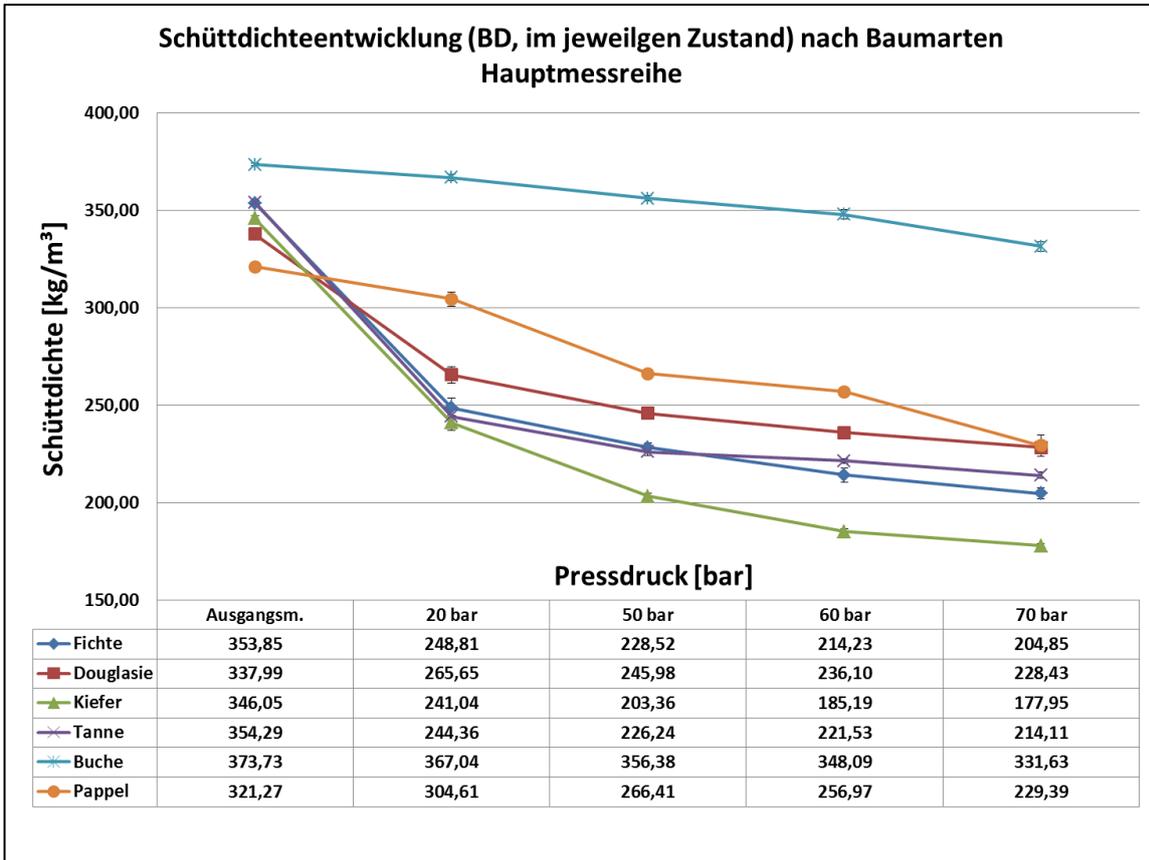
Reduktion relativ zum Ausgangswert Wassergehalt [%] nach Baumart							
Press- druck [bar]		Fichte	Douglasie	Kiefer	Tanne	Buche	Pappel
	20	22,90	22,33	23,02	29,89	1,55	3,64
	50	23,46	27,66	27,15	32,07	2,25	11,56
	60	28,74	29,18	28,32	33,57	4,15	13,02
	70	28,20	30,56	28,41	34,77	7,26	18,48

Auf Basis der Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass bereits bei 20 bar Druck ein starker Abfall zu erreichen ist. Dieser lässt sich zwar durch höheren Druck mit 50, 60 oder 70 bar weiter senken, der Abfall fällt hier jedoch weniger stark aus. Die Reduktionsrate zwischen 60 und 70 bar verläuft auf geringem Niveau mit etwa 1% bei allem Baumarten bis auf Pappel (ca. 3%).

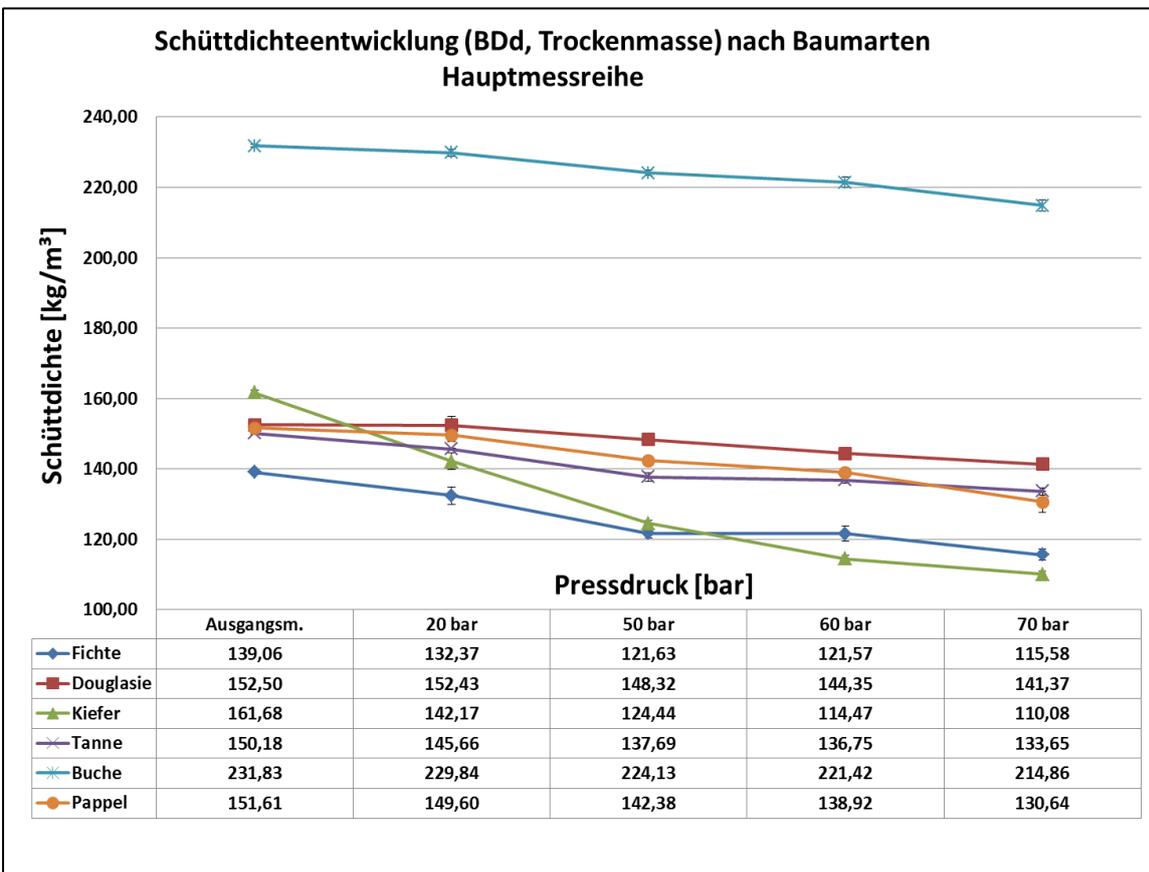
#### 4.5.2 Auswirkungen auf die Schüttdichte (EN 15103:2010)

Der Einfluss der unterschiedlichen Druckvarianten wird nicht nur bei der Entwicklung der Wassergehalte deutlich, sondern stellt sich auch bei den Ergebnissen der Schüttdichteentwicklung als entscheidend heraus. Die Schüttdichte des Hackguts, sinkt bei steigendem Druck und weist bei allen Baumarten bei 70 bar den geringsten Wert auf (Abbildung 63 und Abbildung 64). Besonders die Nadelbaumarten Kiefer, Fichte, Douglasie und Tanne weisen dabei die höchste Reduktion auf. Die maximale Reduktion beträgt 149 kg/m<sup>3</sup> bei Fichte, 110 kg/m<sup>3</sup> bei Douglasie, 168 kg/m<sup>3</sup> bei Kiefer sowie 140 kg/m<sup>3</sup> bei Tanne. Die Laubbaumarten zeichnen sich durch geringe Abnahmewerte aus (Buche 42 kg/m<sup>3</sup>, Pappel 92 kg/m<sup>3</sup>).

Diese Tendenz der Abnahme der Schüttdichte mit steigendem Druckniveau ist ebenfalls bei der Berechnung der Schüttdichte der Trockensubstanz zu erkennen. Jedoch verlaufen die Kurven hier deutlich flacher, erreichen jedoch ebenfalls bei 70 bar die geringsten Werte. Die Reduktionswerte liegen hier bei 24 kg/m<sup>3</sup> für Fichte, 11 kg/m<sup>3</sup> bei Douglasie, 52 kg/m<sup>3</sup> bei Kiefer, 17 kg/m<sup>3</sup> bei Tanne, 17 kg/m<sup>3</sup> bei Buche sowie 21 kg/m<sup>3</sup> bei Pappel.



**Abbildung 63:** Entwicklung der Schüttdichte (BD, im jeweiligen Zustand) bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten



**Abbildung 64:** Entwicklung der Schüttdichte (BDd, Trockenmasse) bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten

### 4.5.3 Auswirkungen auf die Korngrößenverteilung (CEN/TS 15149-1:2010)

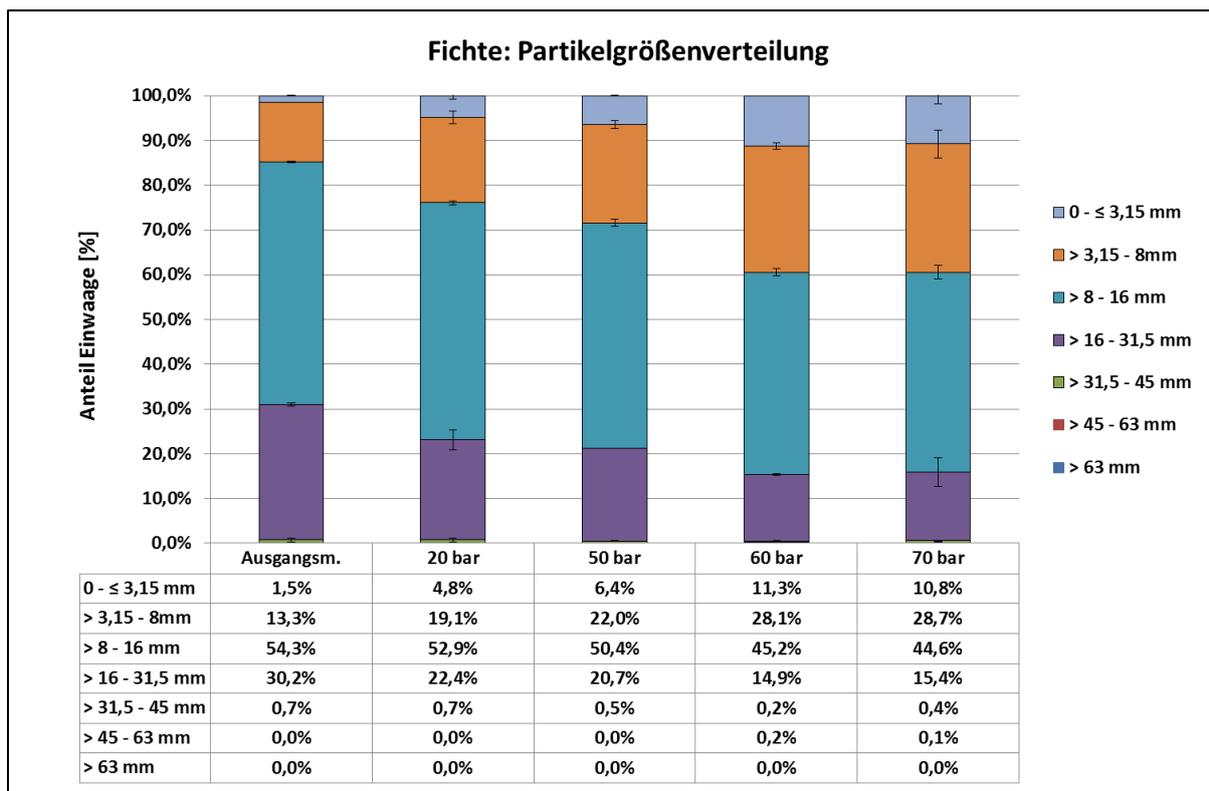
Die unten aufgeführten Ergebnisse der Korngrößenverteilungen der einzelnen Baumarten, zeigen eine vergleichbare Entwicklung der Feingutanteile (Fraktionsgrößen <3,15 mm). Bei allen Versuchen nehmen diese bei steigendem Pressdruck zu.

Dabei zeigen sich die geringsten Ausgangswerte für die Hackgutarten derjenigen Baumarten, die im Vorhinein abgesiebt wurden. Auch der Anteil der nächst größeren Fraktionsgröße (>3,15 – 8 mm) nimmt mit steigendem Pressdruck zu.

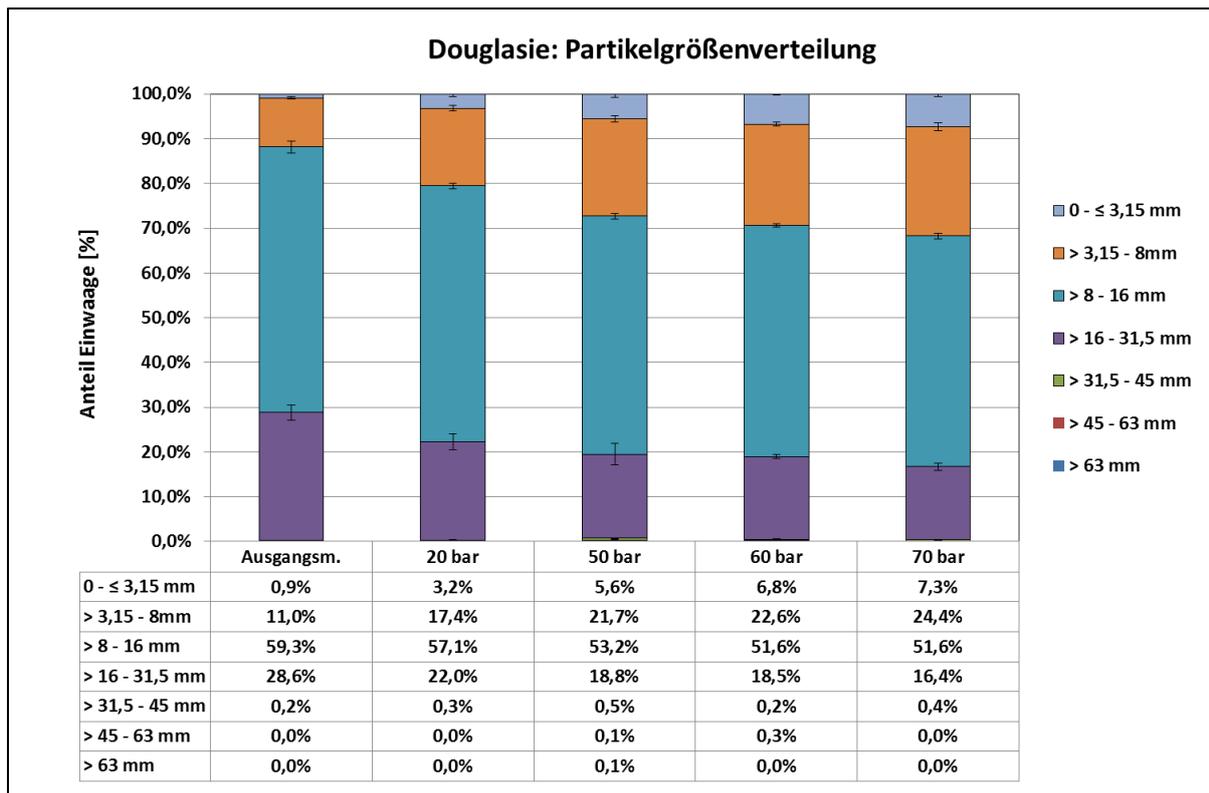
Im gleichen Verhältnis, mit der die Zunahme der feineren Fraktionen erfolgt, verringert sich der prozentuale Anteil der gröberen Fraktionen. Lediglich bei Buche zeigt sich eine kurzfristige Abnahme des Feingutanteils bei 20 bar im Vergleich zum Ausgangsmaterial, der sich allerdings bei höherem Druck wieder deutlich ausbildet (vgl. Abbildung 66 bis Abbildung 71).



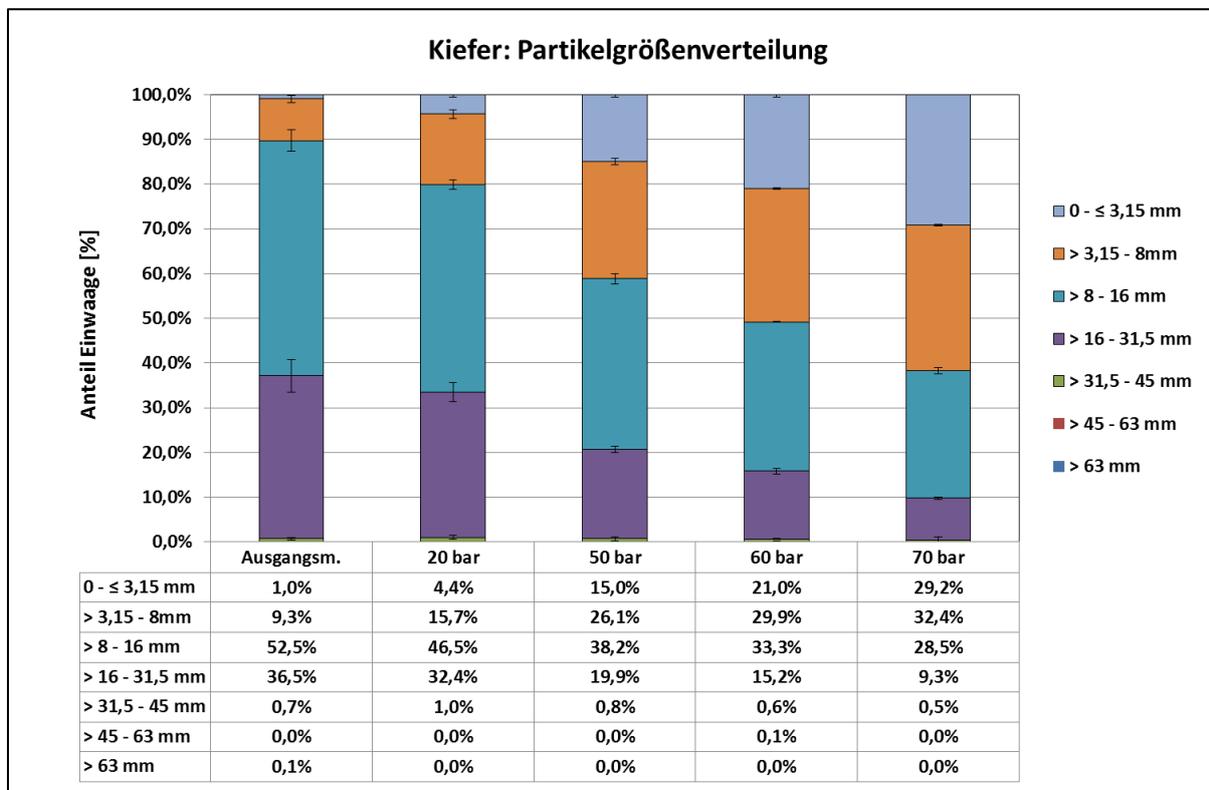
**Abbildung 65:** Hackgutpartikel nach der Pressung



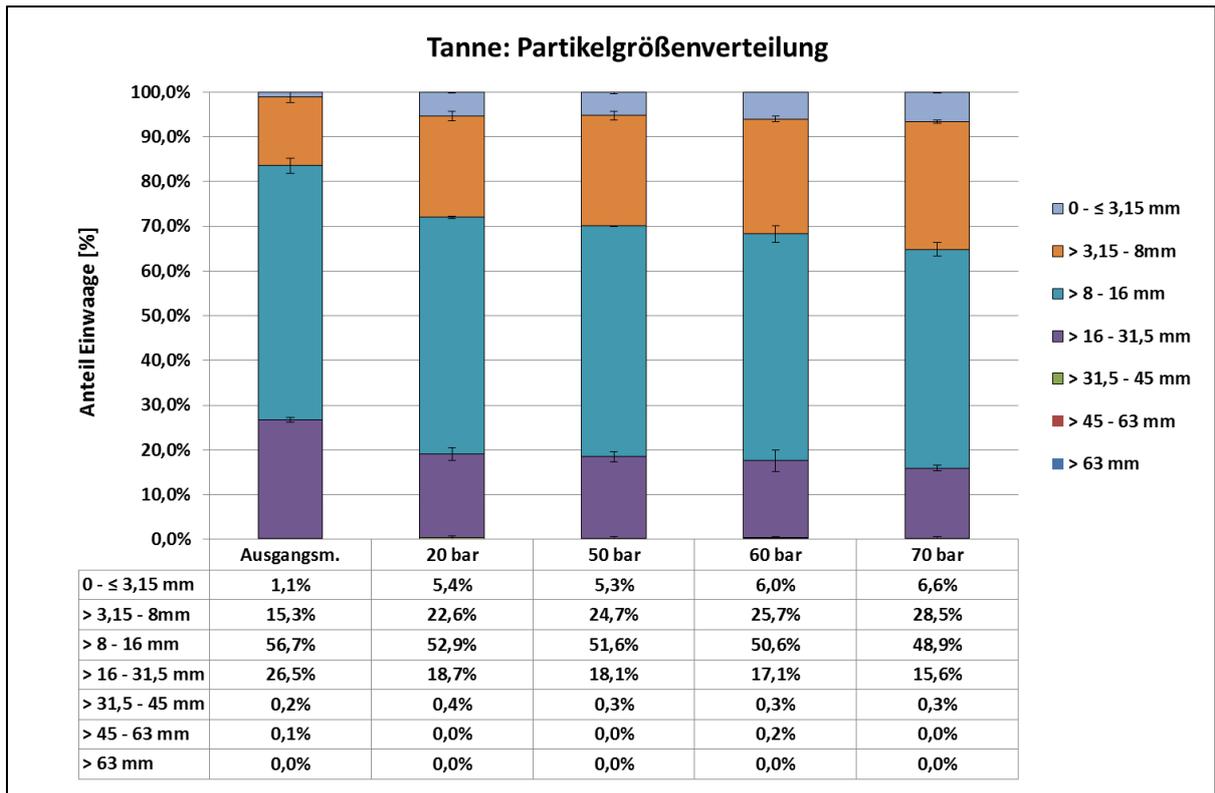
**Abbildung 66:** Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Fichte bei ansteigendem Druckniveau



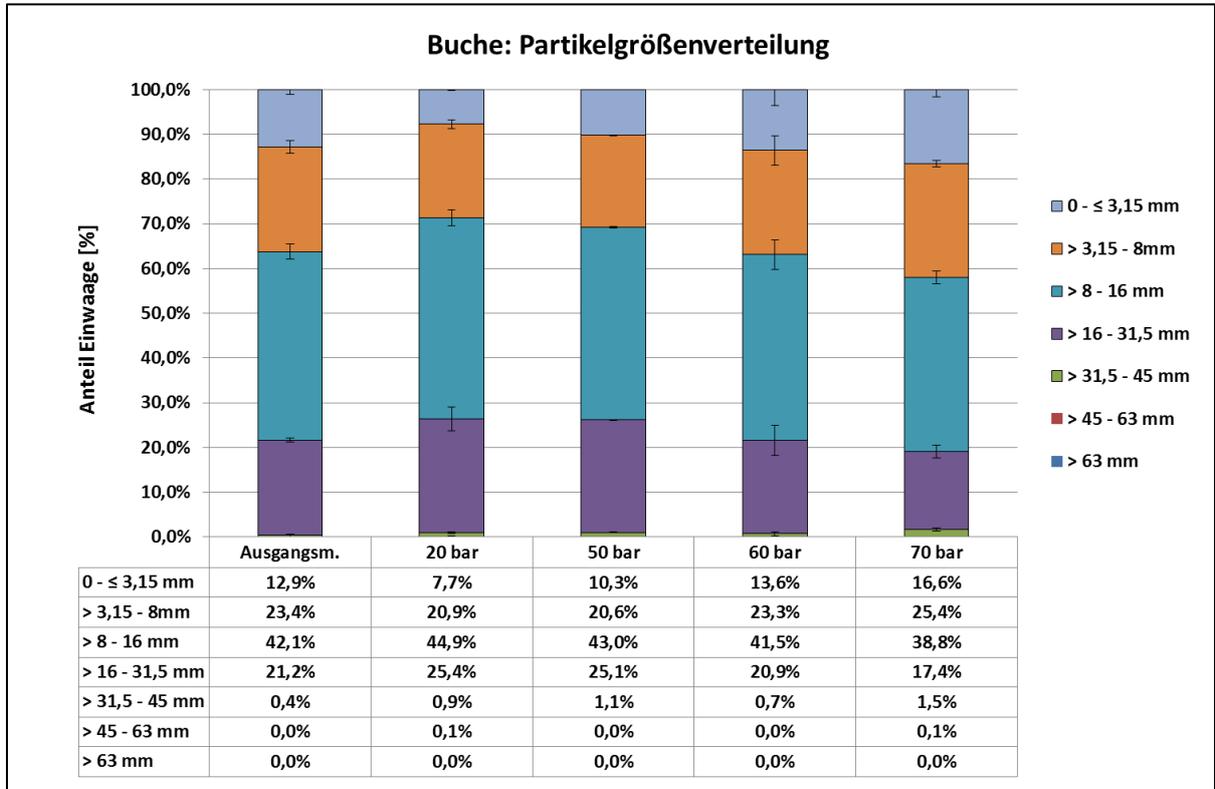
**Abbildung 67:** Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Douglasie bei ansteigendem Druckniveau



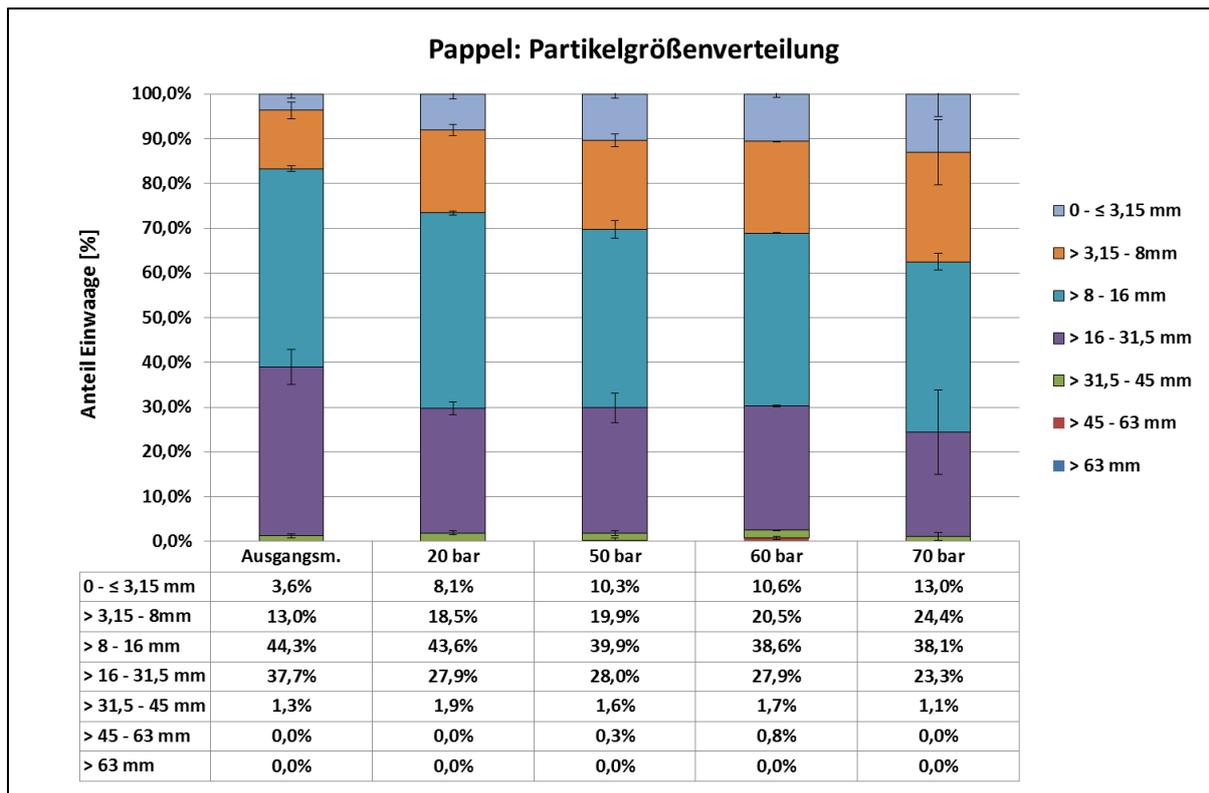
**Abbildung 68:** Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Kiefer bei ansteigendem Druckniveau



**Abbildung 69:** Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Tanne bei ansteigendem Druckniveau



**Abbildung 70:** Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Buche bei ansteigendem Druckniveau



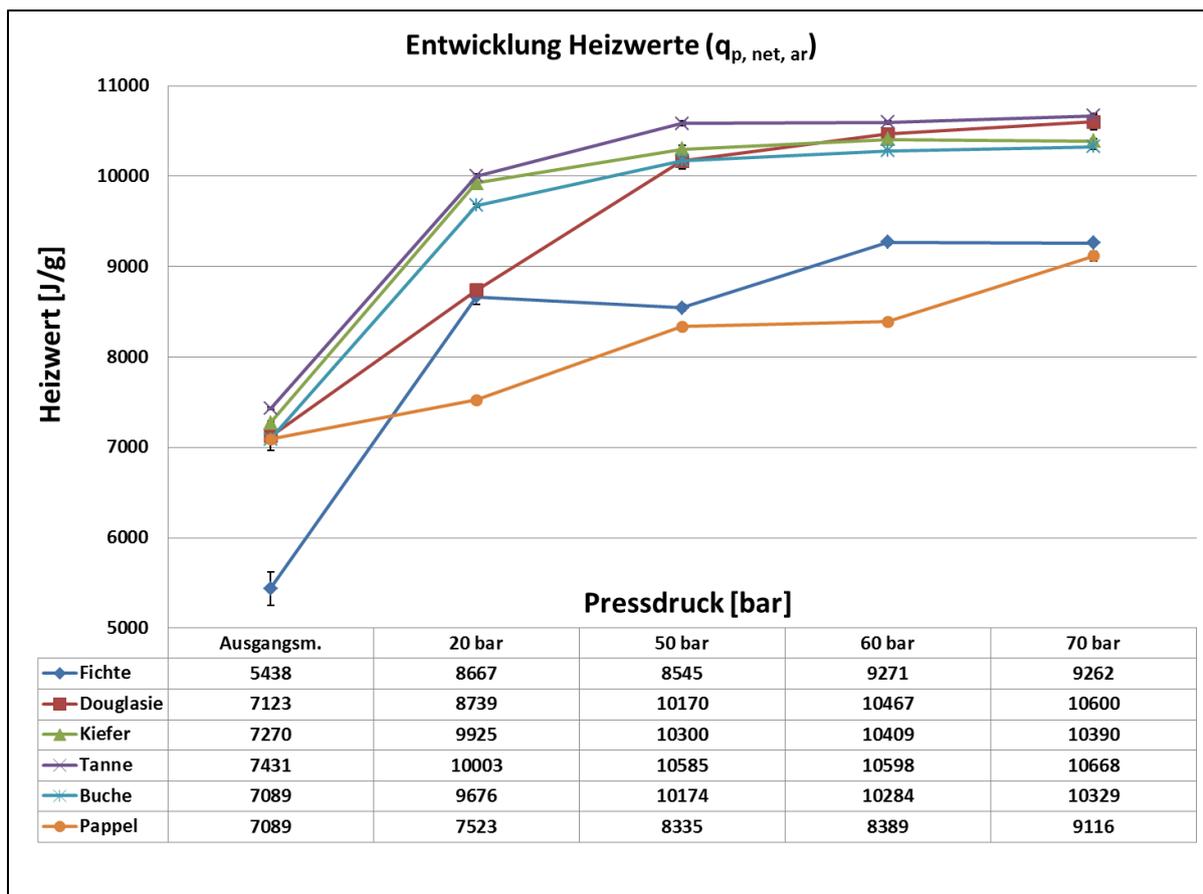
**Abbildung 71:** Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Pappel bei ansteigendem Druckniveau

#### 4.5.4 Auswirkungen auf Heiz- und Brennwert

Die Tendenzen der Wassergehaltsentwicklung spiegeln sich in erwartungsgemäß im Energiegehalt wieder. Insgesamt steigen die Heizwerte mit steigendem Pressdruck stark an. Insbesondere das Fichtenhackgut weist einen starken Anstieg auf.

Dieser Anstieg beträgt im Verhältnis zum Ausgangswert über 70 %. Bei den Baumarten Douglasie ca. 49 %, ca. 43 % bei Kiefer, ca. 44% bei Tanne, etwa 45% bei Buche und ca. 29% bei Pappel.

Der Brennwert (wassergehaltsunabhängig) dagegen bleibt naturgemäß bei allem Baumarten nahezu gleich.



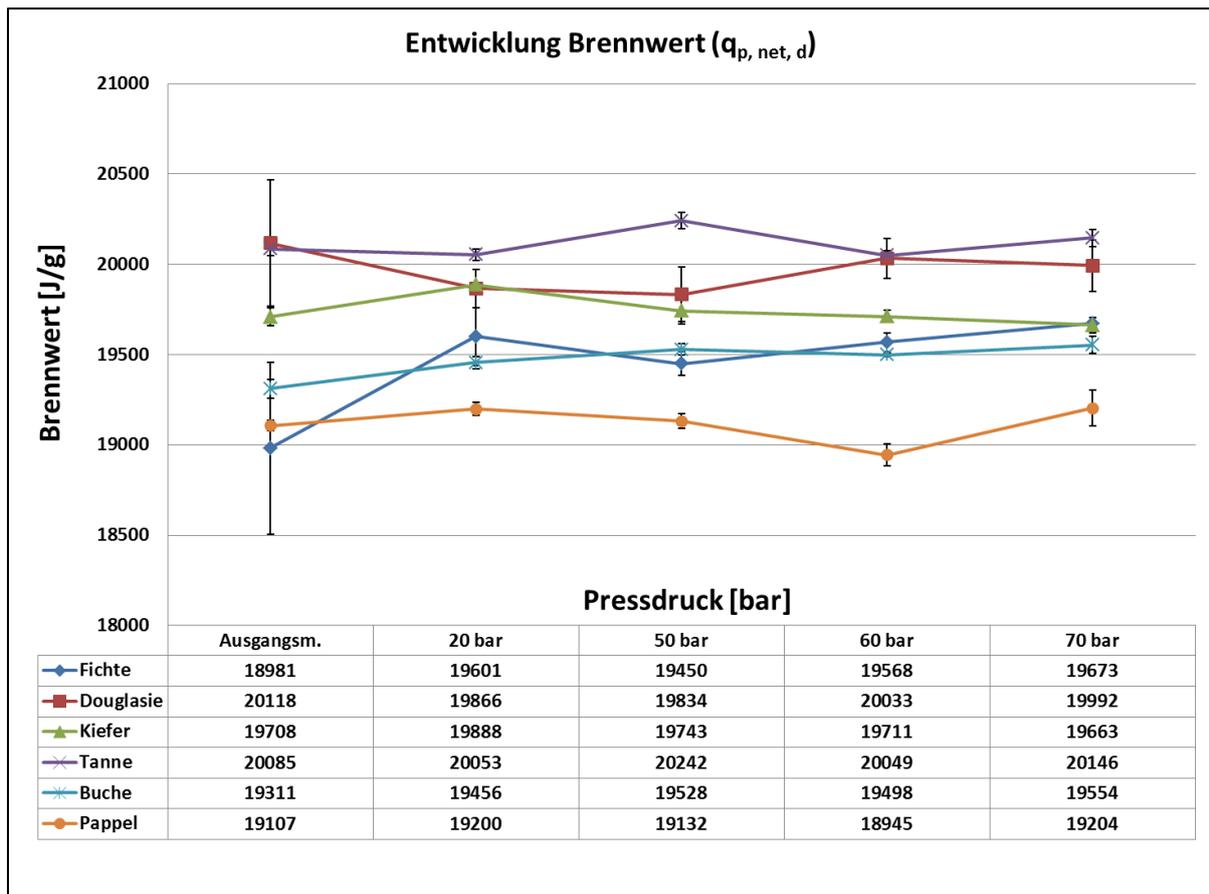
**Abbildung 72:** Entwicklung der Heizwerte (mit jeweiligem Wassergehalt) bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten

**Tabelle 31:** Entwicklung des Heizwertes in Joule/Gramm absolut im Vergleich zum Ausgangswert nach Baumart

Steigerung des Heizwerts ( $q_{p, net, ar}$ ) [J/g] absolut zum Ausgangswert nach Baumart							
Pressdruck [bar]		Fichte	Douglasie	Kiefer	Tanne	Buche	Pappel
	20	3229	1616	2655	2572	2587	434
	50	3107	3047	3029	3154	3085	1246
	60	3832	3345	3139	3167	3195	1300
	70	3824	3477	3120	3237	3240	2027

**Tabelle 32:** Entwicklung des Heizwertes in Prozent relativ zum Ausgangswert nach Baumart

Steigerung des Heizwerts ( $q_{p, net, ar}$ ) [%] relativ zum Ausgangswert nach Baumart							
Pressdruck [bar]		Fichte	Douglasie	Kiefer	Tanne	Buche	Pappel
	20	59,38	22,69	36,51	34,62	36,49	6,12
	50	57,13	42,77	41,67	42,45	43,52	17,57
	60	70,47	46,96	43,18	42,62	45,07	18,34
	70	70,31	48,82	42,91	43,57	45,70	28,59

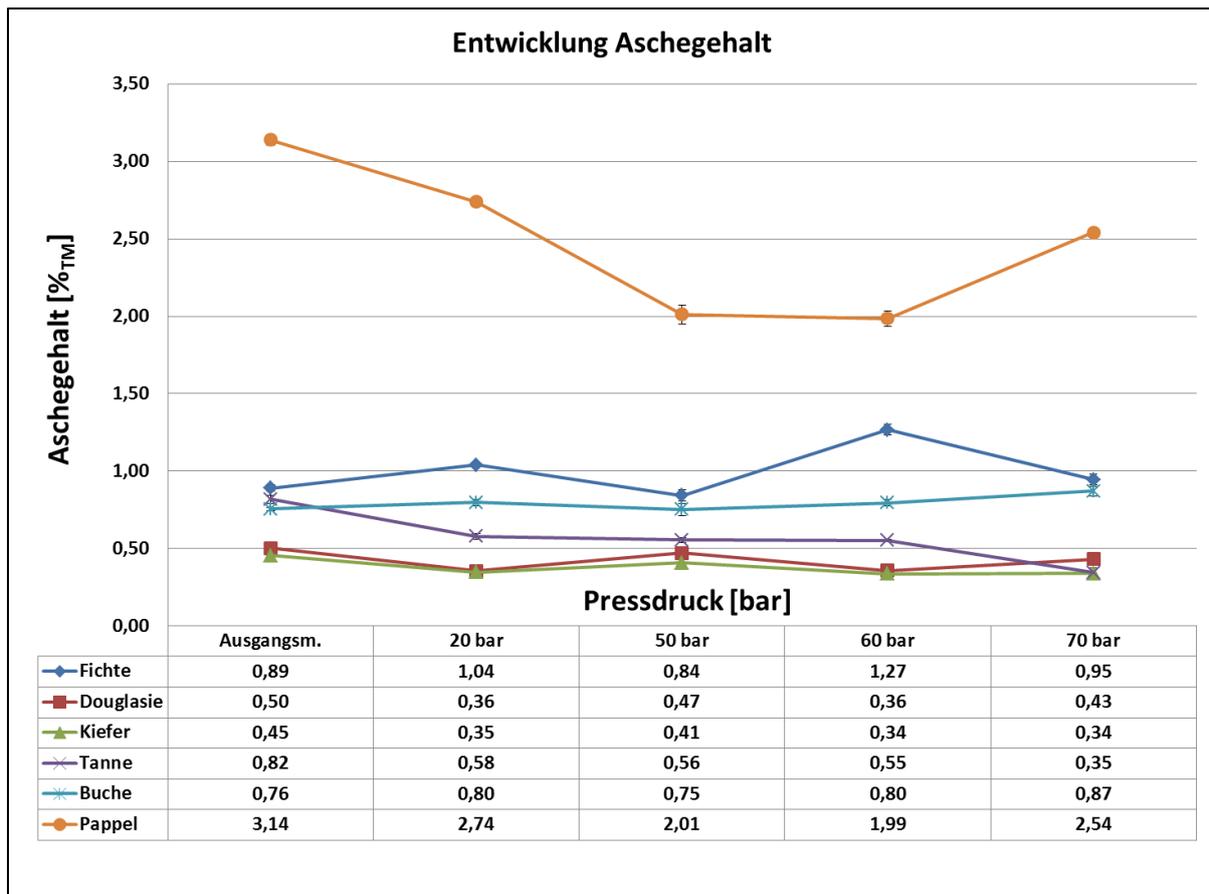


**Abbildung 73:** Entwicklung der Brennwerte bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten

#### 4.5.5 Aschegehaltsentwicklung

Die Entwicklung der Aschegehalte verläuft für die Baumarten Fichte, Douglasie, Kiefer und Pappel in allen Druckniveaus relativ auf einem Level allerdings sind auch Schwankungen zu erkennen, die allerdings keine Tendenz ablesbar machen.

Bei den Baumarten Tanne und Pappel lässt sich allerdings auf Basis der Ergebnisse nachweisen, dass der Aschegehalt mit steigendem Pressdruck (Ausnahme Pappel bei 70 bar) abnimmt. Dabei weist Tanne einen um ca. 57% und bei Pappel einem um ca. 19% reduzierten Wert auf.



**Abbildung 74:** Entwicklung der Aschegehalte der Trockenmasse bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten

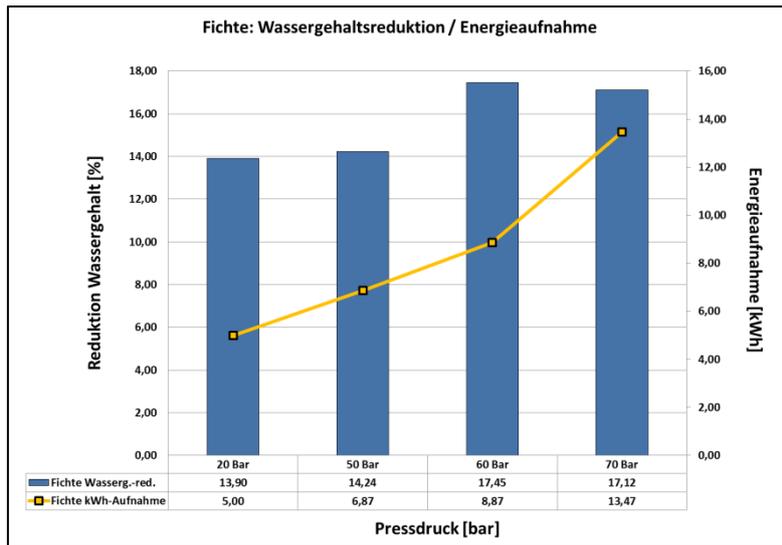
## 4.6 Effizienz des Verfahrens

### 4.6.1 Verhältnis von Wassergehaltsreduktion zu Energieaufnahme

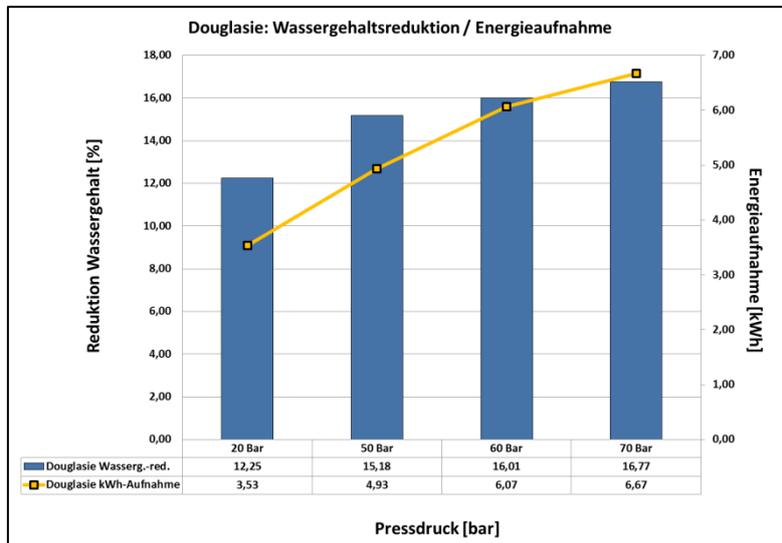
Die Reduktion des Wassergehalts nimmt bei steigendem Pressdruck zu. Dabei zeigt sich, dass die Reduktion zwischen den 60 und 70 bar nur marginal ansteigt.

Die folgenden Ergebnisse stellen das Verhältnis von absoluter Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zum Ausgangswert dar und vergleichen dies mit dem gemessenen Wert für den Stromverbrauch des Gesamtsystems in Umrechnung auf jeweils einen Kubikmeter Hackgut (Ausgangsmaterial).

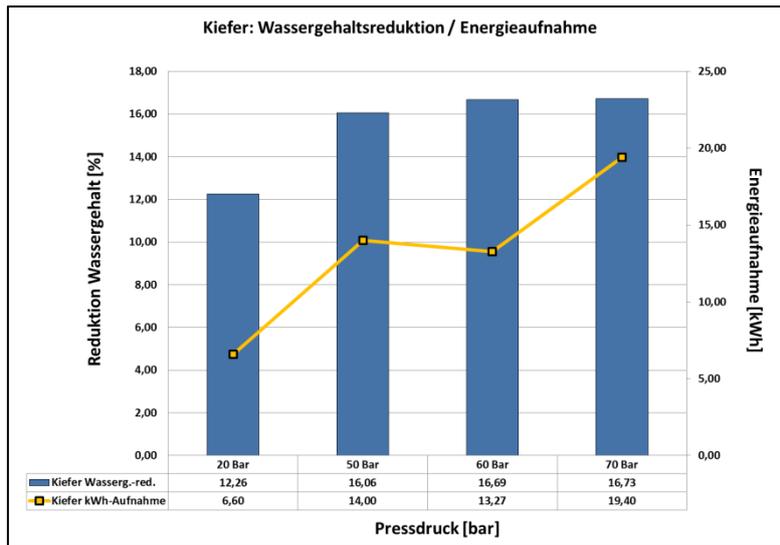
Deutlich lässt sich erkennen, dass der Energiebedarf bei ansteigendem Pressdruck ebenfalls ansteigt. Insbesondere erfolgt bei allem Baumarten eine ausgeprägte Steigerung im Schnitt von 60 auf 70 bar. Hier wird trotz der meist nur marginalen Steigerung der Wassergehaltsreduktion ein erheblich höherer Energiebedarf gemessen.



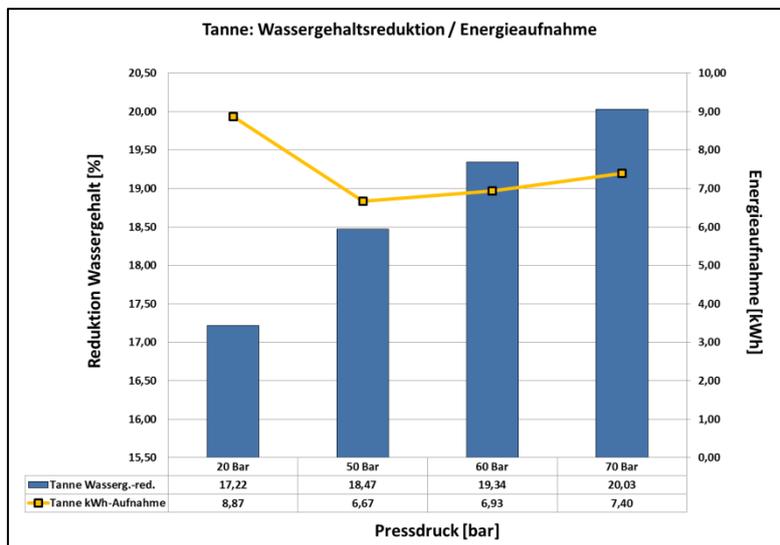
**Abbildung 75:** Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Fichte



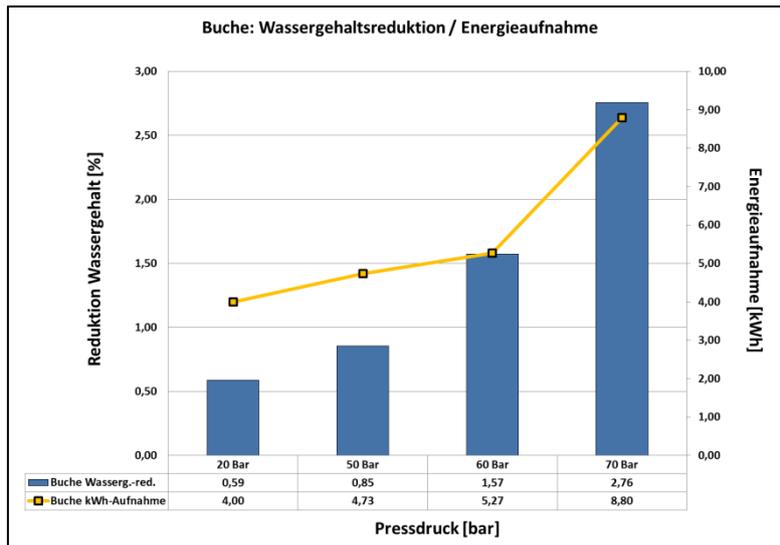
**Abbildung 76:** Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Douglasie



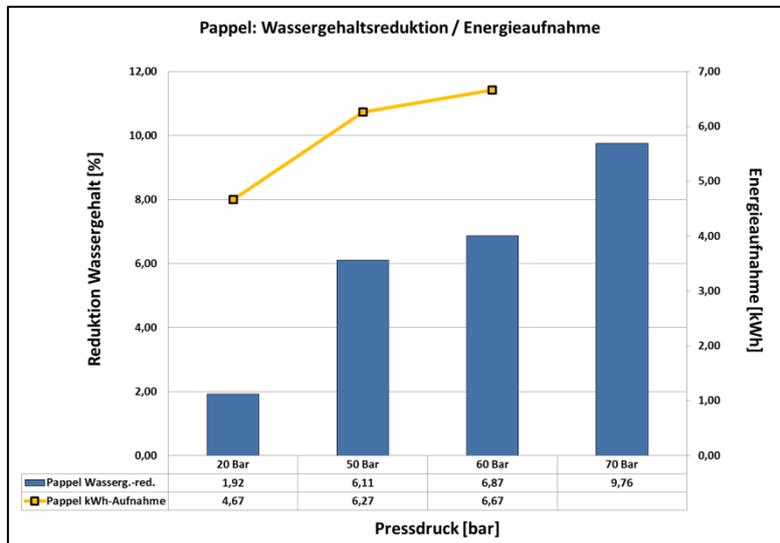
**Abbildung 77:** Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Kiefer



**Abbildung 78:** Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Tanne



**Abbildung 79:** Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Buche



**Abbildung 80:** Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Pappel

Die nachfolgende Tabelle stellt den Zusammenhang von Wassergehaltsreduktion, Energieverbrauch und Energiekosten in Euro pro Kubikmeter dar.

**Tabelle 33:** Wassergehaltsreduktion (absolut) im Verhältnis zu Energieaufnahme und Energiekosten

<b>Fichte</b>				
<b>Pressdruck [bar]</b>		<b>Wasserg.-red. [%]</b>	<b>Energieaufnahme [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Energiekosten [€/m<sup>3</sup>] (1 kWh = 0,17 €)</b>
	20	13,90	5,00	0,85
	50	14,24	6,87	1,17
	60	17,45	8,87	1,51
	70	17,12	13,47	2,29
<b>Douglasie</b>				
<b>Pressdruck [bar]</b>		<b>Wasserg.-red. [%]</b>	<b>Energieaufnahme [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Energiekosten [€/m<sup>3</sup>] (1 kWh = 0,17 €)</b>
	20	12,25	3,53	0,60
	50	15,18	4,93	0,84
	60	16,01	6,07	1,03
	70	16,77	6,67	1,13
<b>Kiefer</b>				
<b>Pressdruck [bar]</b>		<b>Wasserg.-red. [%]</b>	<b>Energieaufnahme [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Energiekosten [€/m<sup>3</sup>] (1 kWh = 0,17 €)</b>
	20	12,26	6,60	1,12
	50	16,06	14,00	2,38
	60	16,69	13,27	2,26
	70	16,73	19,40	3,30
<b>Tanne</b>				
<b>Pressdruck [bar]</b>		<b>Wasserg.-red. [%]</b>	<b>Energieaufnahme [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Energiekosten [€/m<sup>3</sup>] (1 kWh = 0,17 €)</b>
	20	17,22	8,87	1,51
	50	18,47	6,67	1,13
	60	19,34	6,93	1,18
	70	20,03	7,40	1,26
<b>Buche</b>				
<b>Pressdruck [bar]</b>		<b>Wasserg.-red. [%]</b>	<b>Energieaufnahme [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Energiekosten [€/m<sup>3</sup>] (1 kWh = 0,17 €)</b>
	20	0,59	4,00	0,68
	50	0,85	4,73	0,80
	60	1,57	5,27	0,90
	70	2,76	8,80	1,50
<b>Pappel</b>				
<b>Pressdruck [bar]</b>		<b>Wasserg.-red. [%]</b>	<b>Energieaufnahme [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Energiekosten [€/m<sup>3</sup>] (1 kWh = 0,17 €)</b>
	20	1,92	4,67	0,79
	50	6,11	6,27	1,07
	60	6,87	6,67	1,13
	70	9,76	n.b.	n.b.

Es wird deutlich, dass die Energiekosten für die Pressung bei 70 bar im Verhältnis zu den Kosten bei 60 bar überproportional ansteigen, wobei die Reduktion der Wassergehalte insbesondere bei dem Nadelbaumarten ab 60 bar stagniert.

## 4.7 Presswasseranalytik

### 4.7.1 Vorversuch

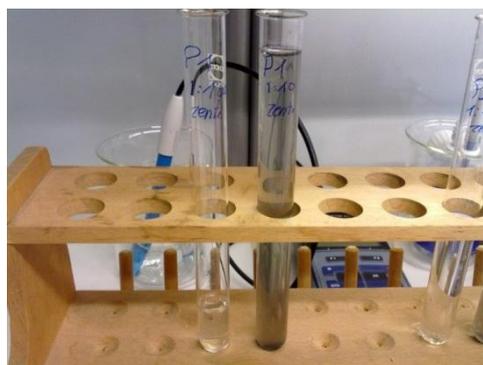
Die Ergebnisse des Vorversuchs werden in Tabelle 34 zusammengefasst dargestellt, wobei die drei Stichproben mit P1, P2 und P3 bezeichnet werden.

Die intensive Färbung und der Schwebstoffgehalt der Presswasserproben erforderten Verdünnungen im Verhältnis von 1:10 und 1:100 mit bi-distilliertem Wasser. Zur Analyse von Sulfat wurden die 1:100 Verdünnungen 30 Minuten lang mit 40.000 U/min zentrifugiert.

**Tabelle 34:** Messergebnisse des Vorversuchs

Parameter	Messbereich	Ergebnis					
<b>Physikalische Parameter:</b>							
Geruch		Intensität: stark, Art: holzig, nach Harz					
Färbung		Scheinbare Färbung nach ISO 7887, Verfahren A: dunkel, gräulich braun					
		<b>P1</b>		<b>P2</b>		<b>P3</b>	
Leitfähigkeit	1 µS/cm – 2 S/cm	946 µS/cm		983 µS/cm		1129 µS/cm	
<b>Chemische Parameter:</b>							
pH	-2,0 – 20,0	5,6		5,6		5,3	
BSB <sub>5</sub> in [mg/l]	0-200 mg/l	130		142		-	
	0-400 mg/l	329		-		352	
	0-800 mg/l	-		-		-	
Verdünnungen im Verhältnis		1:10	1:100	1:10	1:100	1:10	1:100
CSB in [mg/l]	50-600 mg/l		514		556		624
	100-1500 mg/l	>1500	586	>1500	618	>1500	674
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> in [mg/l]	0,2-3 mg/l	>8	>8	>8	>8	>8	>8
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> in [mg/l]	1-120 mg/l		<1,0		<1,0		<1,0
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> in [mg/l]	0,2-5 mg/l	0,24		0,28	<0,2	0,33	<0,2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> in [mg/l]	25-200 mg/l	-	-	-	-	-	-
Fe <sup>2+/3+</sup> in [mg/l]	0,04-1,0 mg/l	>1,0	1,9	>1,0	2,5	>1,0	2,0

Trübungen können die Sulfat-Bestimmung stören. Diese konnten aber trotz Probenvorbehandlung durch Verdünnung und Zentrifugieren nicht vollständig eliminiert werden (vgl. Abbildung 81).



**Abbildung 81:** Überstände der zentrifugierten Verdünnungen 1:10 und 1:100 von P1 zeigen noch deutliche Trübungen (SCHLÖR, 2013)

Die Leitfähigkeit einer Lösung ist stark temperaturabhängig, daher werden die Messwerte auf die Referenztemperatur von 25°C bezogen. Der WTW Messumformer für die Standard-Leitfähigkeitsmesszelle besitzt eine Temperaturkompensations-einrichtung und korrigiert so die Leitfähigkeitswerte mittels eingestelltem Temperaturkoeffizienten. Die gemessenen Leitfähigkeiten von 946-1129  $\mu\text{S}/\text{cm}$  liegen im Bereich der Werte für Oberflächenwasser.

Die pH-Werte aller drei Stichproben liegen mit den Werten zwischen 5,3 – 5,6 im deutlich sauren Bereich.

Die Messungen des biologischen Sauerstoffbedarfs innerhalb von 5 Tagen, also die Menge an Sauerstoff, die von Mikroorganismen benötigt wird, um die organische Substanz einer Wasserprobe aerob abzubauen, ergaben sehr niedrige Werte oder Messfehler. Dies könnte zum einen am Sauerstoff-Mangel in den Proben und zum anderen an einer zu geringen Menge und Aktivität von Mikroorganismen gelegen haben. Mit Klärschlamm konnten die Proben nicht angeimpft werden. Außerdem könnten phenolische Verbindungen in den Presswasserproben bakterizid gewirkt haben.

Deutlich hohe CSB-Werte im Bereich von rund 60.000 mg/l lassen auf eine hohe organische Belastung des Presswassers schließen. Das Verhältnis von CSB zu  $\text{BSB}_5$  zeigt den Grad der biologischen Abbaubarkeit an. Das Verhältnis von CSB- zu  $\text{BSB}_5$ - Gehalt spiegelt den Anteil an schwer abbaubaren organischen Verbindungen in einer Abwasserprobe wider.

Für keinen der chemischen Parameter, wie Ammonium, Nitrat, Phosphat oder Eisen konnten mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Messmethoden auswertbare Messergebnisse erzielt werden. Die erhaltenen Werte waren entweder außerhalb der Messbereiche oder zu nahe an den Messgrenzen der jeweiligen Messverfahren.

Folgende Voraussagen zur Qualität des Presswassers können dennoch zusammenfassend getroffen werden:

- Die Leitfähigkeit als Maß für die Ionenkonzentration deutet auf eine mittlere Salzbelastung der Presswasser hin. Der Säuregehalt spielt hier ebenso eine Rolle, was der pH-Wert bestätigen konnte.
- Der pH-Wert liegt im deutlich sauren Bereich.
- Es ist mit sehr hohen CSB - Werten im Vergleich zu den  $\text{BSB}_5$  - Werten und damit mit einem hohen Anteil schwer abbaubarer organischer Verbindungen zu rechnen.
- Es ist mit einem höheren Ammonium-Gehalt zu rechnen.
- Der Nitrat-Gehalt spielt im Presswasser keine Rolle.
- Die Phosphat-Werte mit ca. 0,3 mg/l geben keine Auskunft über den Gesamt-Phosphor-Gehalt im Presswasser.
- Der Sulfat-Gehalt konnte mit der vorhandenen Messmethode nicht ermittelt werden.
- Die Eisen-Konzentration ist höher als 1 mg/l.

Aufgrund der Mess-Ergebnisse lässt sich bereits zu diesem Zeitpunkt eine Direkteinleitung des Presswassers in ein Fließgewässer ohne vorgeschaltete Reinigung ausschließen.

Für konkretere Aussagen zur Qualität des Presswassers und damit zu dessen Einordnung als Abwasser oder als Produkt wurden ausführlichere und exaktere Analysen notwendig.

Dazu wurden die Presswasser-Proben der Hauptmessreihe an ein erfahrenes Analyselabor weitergeleitet.

#### 4.7.2 Hauptmessreihe

Alle Analysenergebnisse vom Analyselabor für die Hauptmessreihe sind im Anhang beigefügt und in den Tabelle 35 und Tabelle 36 zusammengestellt.

Die Pressungen der Kiefernhackschnitzel erwiesen sich aus technischen Gründen als langwierig: Sie dauerten länger als zwei Stunden. Damit überschritt die Probenahmedauer der Kiefern-Mischprobe die vorgegebenen zwei Stunden für eine 2-Stunden-Mischprobe. Der Gehalt an biologisch leicht abbaubaren Verbindungen könnte sich dadurch reduziert haben. Der gemessene BSB<sub>5</sub>-Wert der Kiefern-Mischprobe ist damit kritisch zu betrachten.

Das Ausgangsmaterial der Buchenhackchnitzel wies einen geringen Wassergehalt auf, so dass bei allen vier Press-Durchläufen nicht genug Presswasser anfiel. Auf die Analysen von Schwermetallen, Chlorid, AOX und Gesamt-Phosphor sowie auf den Zahn-Wellens-Test und auf die GC-Analyse musste verzichtet werden.

Mittels chromatographischer - massenspektrometrischer Analyse der verschiedenen Presswasser konnte eine Vielzahl von Einzelsubstanzen identifiziert und halbqualitativ ausgewertet werden. In Tabelle 36 wurden nur diejenigen organischen Verbindungen aufgelistet, deren Konzentration über 1 mg/l lag.

**Tabelle 35:** Chemische Analyse-Ergebnisse der Hauptmessreihe

Parameter	Presswasser-Mischproben verschiedener Holzhackschnitzel					
	Douglasie	Pappel	Fichte	Kiefer	Buche	Tanne
Datum der Probenahme	25.04.2013	02.05.2013	02.05.2013	07.06.2013	13.06.2013	13.06.2013
pH	5,0	6,3	5,7	5,1	-	5,5
CSB [mg/l]	29000	28000	19000	25000	13000	15000
BSB <sub>5</sub> [mg/l]	8020	6620	4100	(99)	3700	5700
CSB/BSB <sub>5</sub>	3,6	4,2	4,6	(252)	3,5	2,6
TOC [mg/l]	-	4500	5300	8800	3300	5900
DOC [mg/l]	9200	4400	5000	8300	-	5600
TN <sub>b</sub> [mg/l]	-	210	120	110	77	81
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N [mg/l]	21	34	0,45	4,1	0,64	3,0
NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -N [mg/l]	4,2	1,4	36	1,3	1,0	2,4
Cl <sup>-</sup> [mg/l]	18,0	43,1	47,0	20,0	-	66,9
P <sub>gesamt</sub> [mg/l]	40	210	49	26	-	14
Phenol-Index [mg/l]	130	14	60	30	41	59
AOX [mg/l]	5,8	<2,0	<4,0	<4,0	-	<4,0
<b>Schwermetalle:</b>						
Quecksilber [mg/l]	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	-	<0,0002
Blei [mg/l]	<0,01	0,38	1,2	<0,01	-	<0,01
Cadmium [mg/l]	0,011	0,11	0,012	0,007	-	0,004
Chrom [mg/l]	0,05	0,51	0,15	0,05	-	0,05
Kupfer [mg/l]	0,15	1,9	0,35	0,20	-	0,12
Nickel [mg/l]	0,2	0,46	0,15	0,09	-	0,1
Zink [mg/l]	4,3	9,8	5,7	1,6	-	1,8
<b>Zahn-Wellens-Test</b>	83%	88%	90%	85%	-	92%

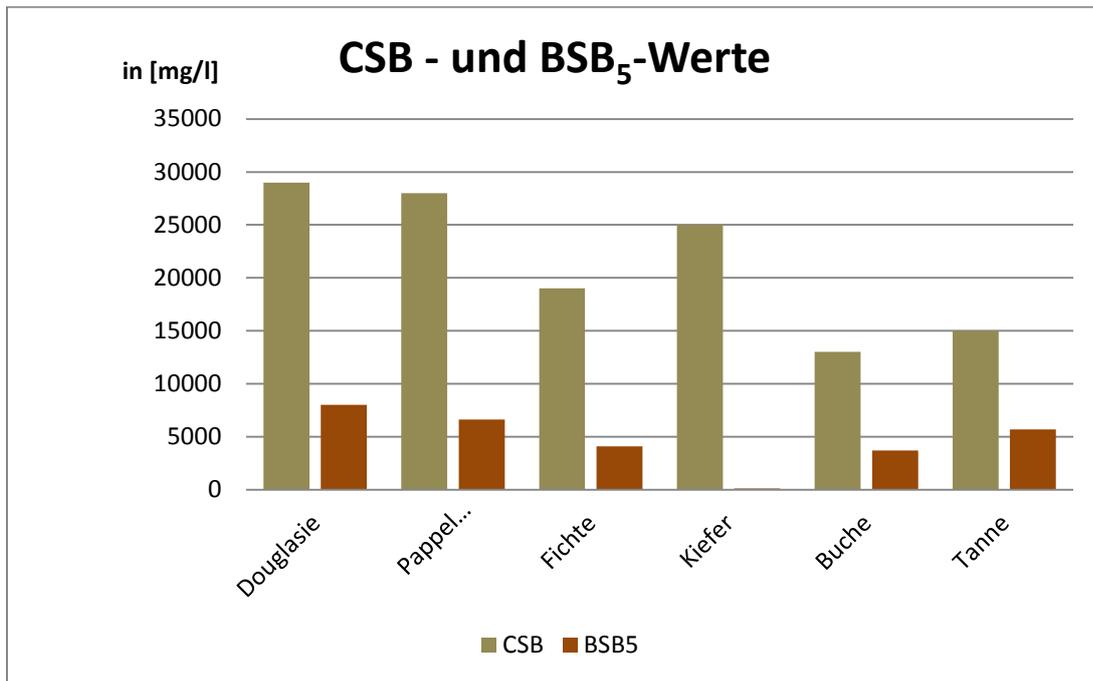
**Tabelle 36:** Analyse-Ergebnisse des GC-MS-Screening auf mittel- bis schwerflüchtige, organische Substanzen

	Presswasser-Mischproben verschiedener Holzhackschnitzel					
	Douglasie	Pappel	Fichte	Kiefer	Buche	Tanne
<b>Substanzen in Konzentrationen &gt; 0,1 mg/l</b>	Halbquantitative Auswertung - Konzentrationen in [mg/l]					
Styrene	0,4					
.alpha.- Pinene	1,0					
.beta.- Pinene	0,4					
<b>3 - Carene</b>	0,1			0,2		
<b>D-Limonene</b>	0,1					0,3
<b>Limonene</b>			0,2	0,1		
Bicyclo[4.1.0]hept-2-ene, 3,7,7-trimethyl-				0,1		
Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene,4-methyl-1-(1-methylethyl)-	0,1					
1S-.alpha.-Pinene	0,1					
Phenol, 2-methoxy-	0,2					
Phenol, 2-methoxy-4-methyl			0,6			
Phenol, 2-methoxy-4-propyl			0,1			
Phenol, 4-methyl-			0,1			
Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-			0,4			
Cyclohexene, 1-methyl-4 -(1-methylethylidene)-	0,2					
Bicyclo[2.2.1]heptan-2-ol, 1,7,7-trimethyl-	0,1		0,5			
<b>Bicyclo[2.2.1]heptan-2-ol, 1,3,3-trimethyl-, (1S-endo)-</b>			0,2	0,4		
Bicyclo[2.2.1]heptan-2-one, 1,3,3-trimethyl			0,5			

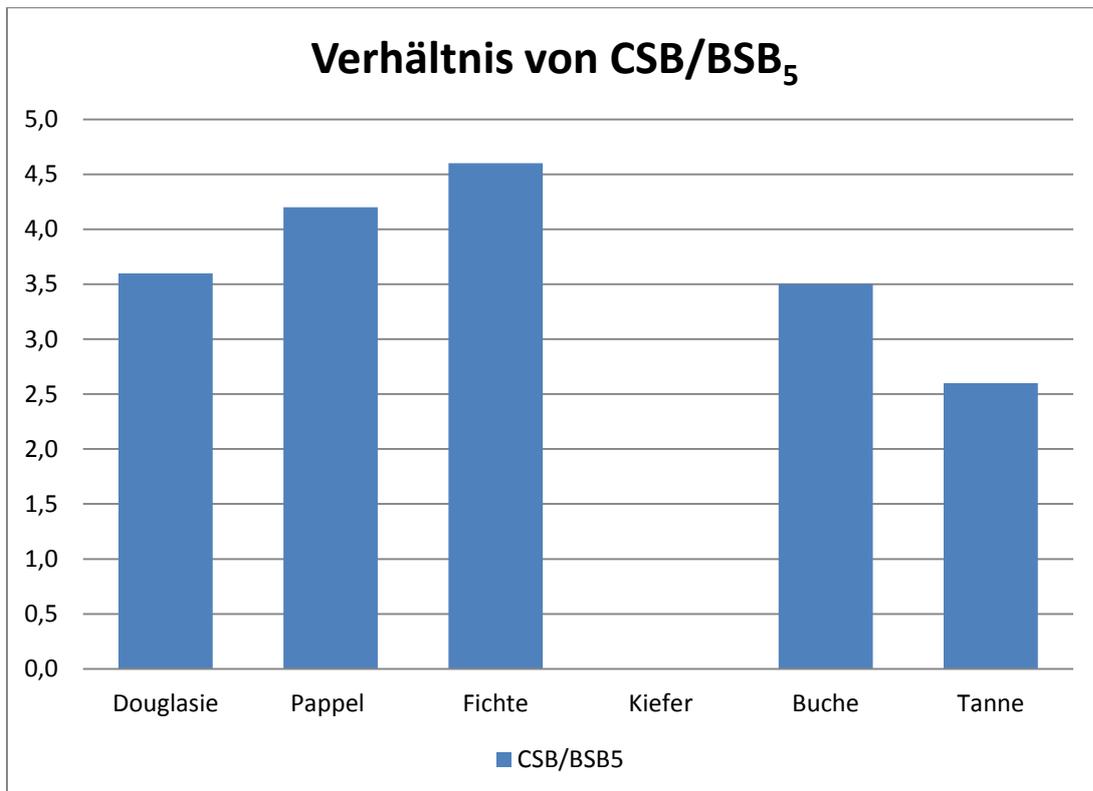
<b>Bicyclo[2.2.1]heptan-2-one, 1,7,7-trimethyl-, (1R)-</b>				<b>0,1</b>		<b>0,1</b>
Bicyclo[3.1.1]hepta-3-ol, 6,6-dimethyl-2-methylene-, [1S-(1.alpha.,3.alpha.,5.alpha.)]-			<b>0,1</b>			
<b>3-Cyclohexen-1-ol, 4-methyl-1-(1-methylethyl)-</b>	<b>1,1</b>		<b>0,3</b>	<b>0,5</b>		<b>0,1</b>
3-Cyclohexen-1-methanol, .alpha., .alpha.4-trimethyl-						<b>0,1</b>
<b>Borneol</b>			<b>0,5</b>	<b>0,2</b>		
<b>p-menth-1-en-8-ol</b>	<b>0,3</b>		<b>0,5</b>	<b>1,8</b>		
2(3H)-Furanone, dihydro-5-pentyl			<b>0,1</b>			
Benzene, 1,2-dimethoxy-4-(2-propenyl)-				<b>0,1</b>		
Heptanoic acid		<b>0,9</b>				
1,6,10-Dodecatrien-3-ol, 3,7,11-trimethyl-						<b>0,2</b>
.tau.-Cadinol			<b>0,1</b>			
Oleic acid			<b>0,3</b>			
<b>Octadecanoic acid</b>			<b>0,1</b>	<b>1,1</b>		
Octanoic acid		<b>0,6</b>				
Nonanoic acid		<b>0,4</b>				
1H-Indole, 3-methyl-		<b>0,1</b>				
n-Hexadecanoic acid		<b>0,1</b>				
(1R,3S)-Cembra-4,7,11,15-tetraen-3-ol				<b>0,1</b>		
Acridin-9-amine, 1,2,3,4-tetrahydro-5,8-dimethyl-				<b>0,2</b>		
1-Phenanthrenecarboxylic acid				<b>0,1</b>		
Abietic acid				<b>0,2</b>		

4.7.2.1

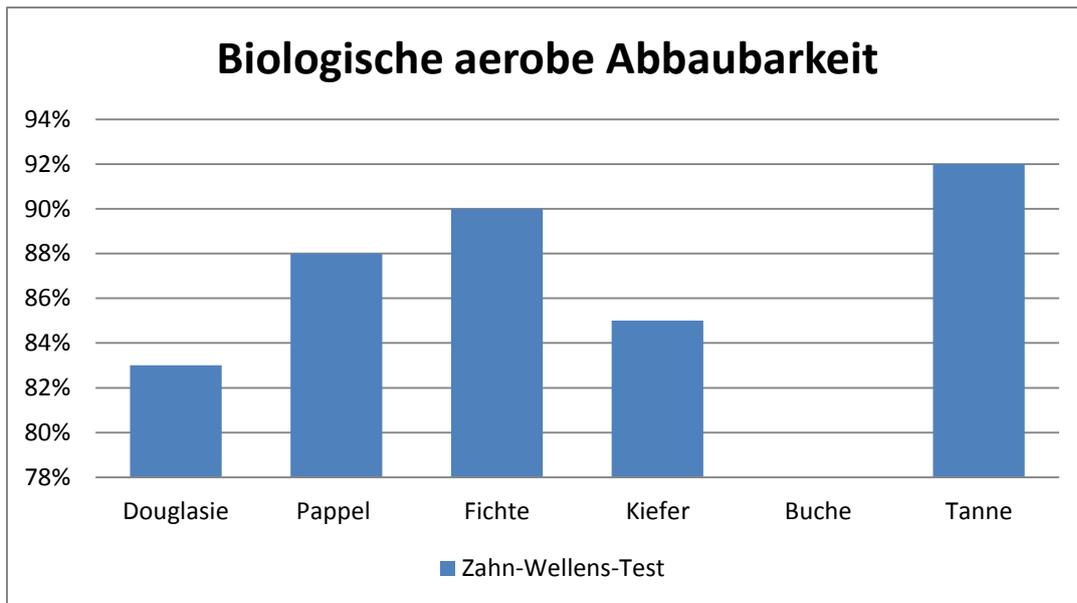
Ergebnisse der wichtigsten Presswasser-Analyse-Parameter



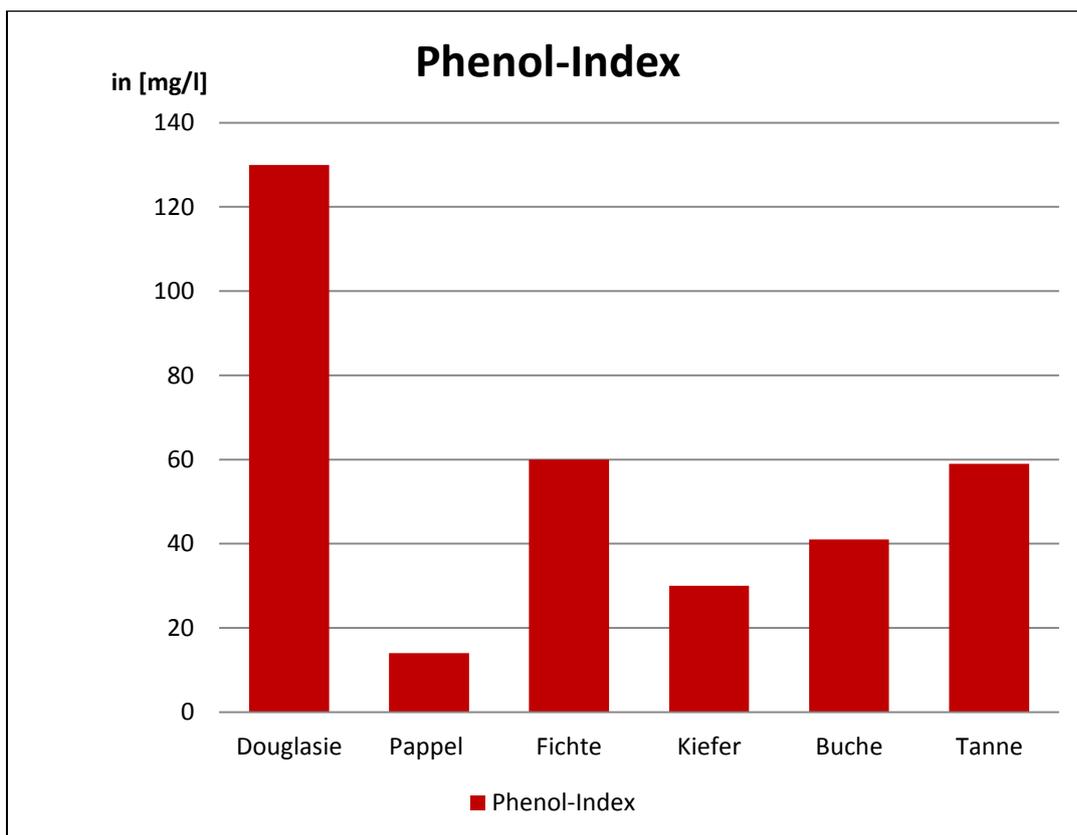
**Abbildung 82:** Analysewerte der Hauptmessreihe für CSB und BSB<sub>5</sub>



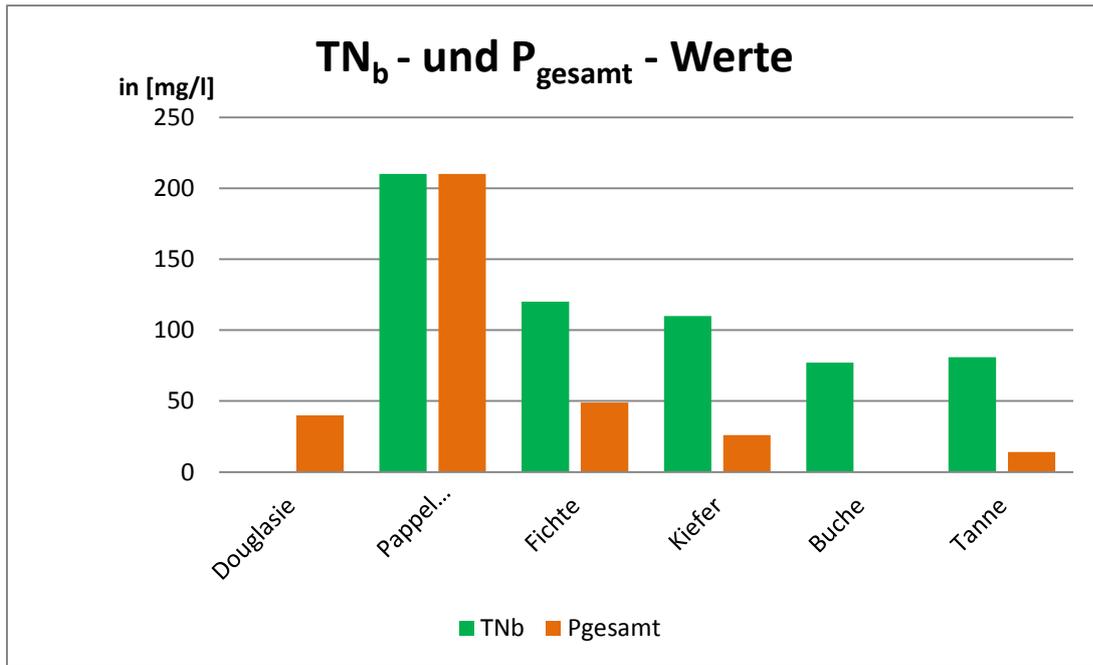
**Abbildung 83:** Werte für die Verhältnisse von CSB zu BSB<sub>5</sub> der Hauptmessreihe



**Abbildung 84:** Analysewerte der Hauptmessreihe für den Zahn-Wellens-Test als Maß für die aerobe biologische Abbaubarkeit in biologischen Behandlungsanlagen

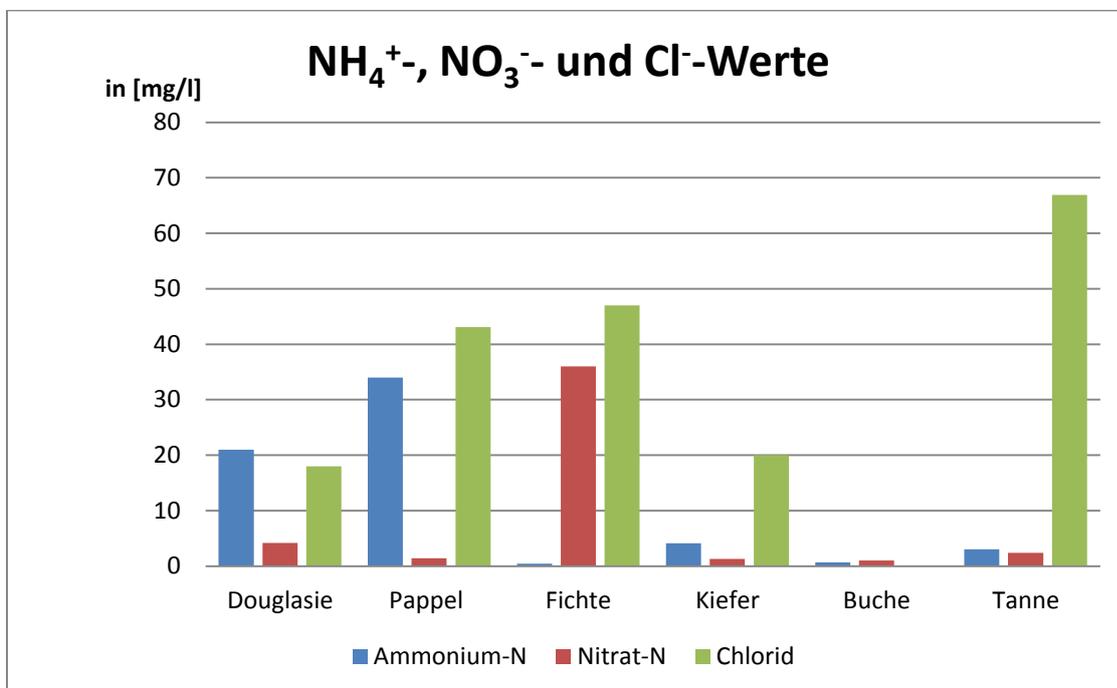


**Abbildung 85:** Analysewerte der Hauptmessreihe für den Phenol-Index

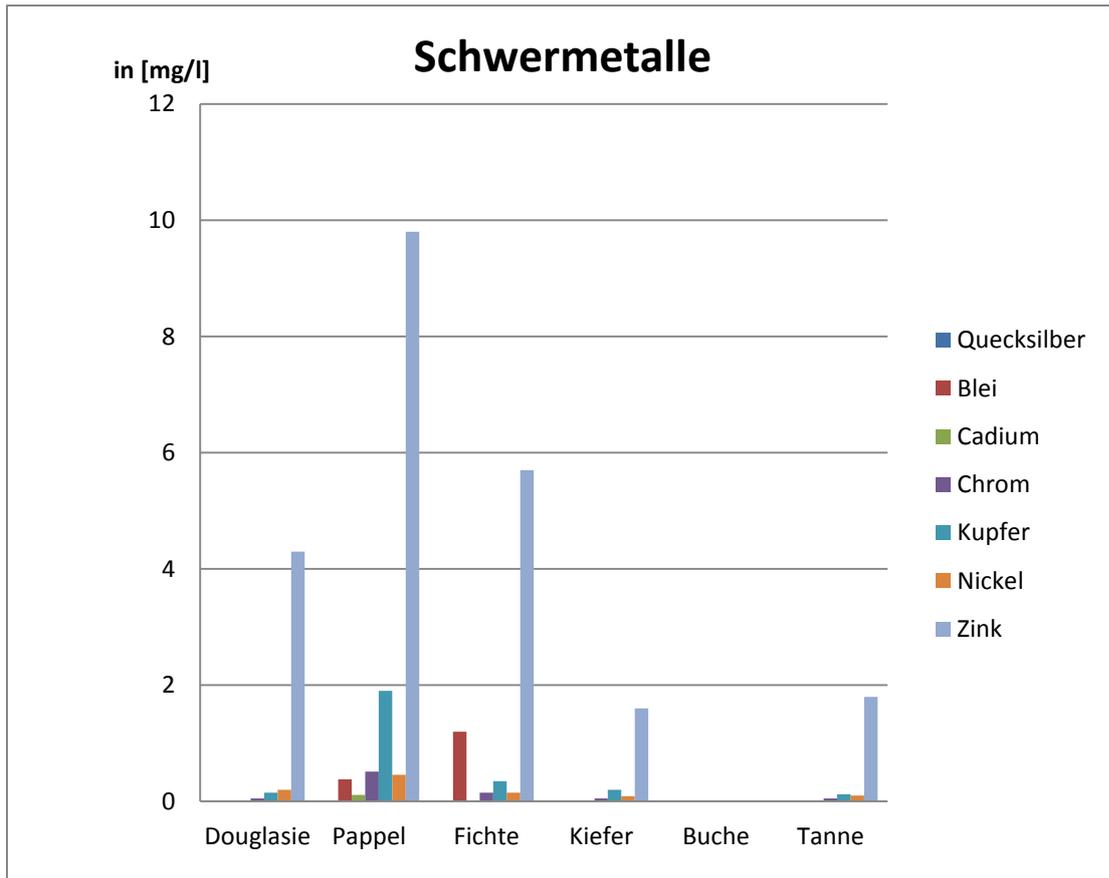


**Abbildung 86:** Analysewerte der Hauptmessreihe für den gesamt gebundenen Stickstoff TN<sub>b</sub> und für Phosphorverbindungen als Phosphor gesamt P<sub>gesamt</sub>

#### Einzelparameter



**Abbildung 87:** Analysewerte der Hauptmessreihe für Ammonium NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Nitrat NO<sub>3</sub><sup>-</sup> und Chlorid Cl<sup>-</sup>



**Abbildung 88:** Analysewerte der Hauptmessreihe für Schwermetalle

## 5 Anlagenerprobung - Bewertung der Ergebnisse

### 5.1 Experimente, Vorversuche

Die ersten experimentellen Versuche zeigten, dass eine mechanische Pressung im Grundsatz dazu geeignet ist, den Wassergehalt von Hackgut signifikant zu reduzieren. Allerdings wurde hier bereits deutlich, dass wohl nur das frei vorliegende Wasser im Holz, das darin adsorptiv gebunden ist, mobilisier- bzw. entfernbar ist. Ebenfalls wurde deutlich, dass die Abführung des Wassers genau im Zeitpunkt des Druckaufbaus in der Presszone erfolgen muss, da das Hackgut anderenfalls bei nachlassender Belastung das Presswasser schwammähnlich sofort wieder aufnimmt. Ebenfalls wurde klar, dass der Entwicklung einer geeigneten Führung der Hackschnitzel vor und nach der Presszone eine hohe Bedeutung für eine effiziente Wirkweise zukommt. Diese Erfahrungen führten maßgeblich zur Entwicklung der Plattenkette, die das Hauptmedium sowohl für die Pressgutführung, als auch für die Abführung des Wassers in der Presszone darstellt.

### 5.2 Vorversuche (Teil 1 bis 3)

Wie in den Ergebnissen des ersten Vorversuchs zu erkennen war, führte die entwickelte Plattenkette sowie weitere Optimierungen zum gewünschten Ergebnis einer deutliche Wassergehaltsreduktion. Dabei stellte sich heraus, dass das waldfrische sowie das angetrocknete Hackgut auf ähnliche Werte abgesenkt werden kann. Die Reduktion kulminierte bei einem Pressdruck von 72 bar, wobei sich der Wassergehalt im Vergleich zu 62 bar nur noch geringfügig reduzieren ließ.

Innerhalb des zweiten Vorversuches konnte die Funktionalität der umlaufenden Plattenkette nachgewiesen werden. Da die Wassergehalte nicht im gleichen Umfang wie im ersten Vorversuch mit einem Plattenabschnitt abgesenkt werden konnten, lässt sich schlussfolgern, dass die Verweildauer des Hackguts in der Presszone einen Einfluss auf die absolute Reduktion hat. Diese war beim ersten Vorversuch systembedingt deutlich länger. Die Ergebnisse der Schüttdichtemessung zeigten die Abnahme der Schüttdichte bei zunehmendem Druck, was für die Schüttdichte (BD, mit jeweiligem Wassergehalt) auf die strake Abnahme des Gewichtes durch die Wassergehaltsreduktion zurückzuführen ist. Die deutlich geringere Abnahme der Schüttdichte der Trockenmasse (BDd) deutet



**Abbildung 89:** Vergleich von gepresste (links) und ungespressten Hackgutpartikel (rechts)

auf einen Auffaserungsprozess durch das Pressen hin, der das Gewicht des Hackgutes im Verhältnis zum Volumen verringern kann (vgl. Abbildung 89), da die aufgefaserten Hackgutpartikel relativ mehr Lagerungsvolumen in Anspruch nehmen als die ungespressten Partikel.

Innerhalb des dritten Vorversuchs, anhand dem die Parametrisierung für die Hauptmessreihe vorgenommen wurden, zeigte sich, dass die Schütthöhe auf der Vibrorinne bzw. die entsprechend höhere Zuführungsmenge in die Presszone keinen Einfluss auf die Wasserreduktion

sowie auf die Schüttdichteentwicklung hatte. Die Parameter wurden so gewählt, dass die Zufuhr auf die maximale Verarbeitungskapazität des Prototyps eingestellt wurde.

### **5.3 Hauptmessreihe**

#### **5.3.1 Auswirkungen auf den Wassergehalt**

Im Rahmen der Analysen konnte gezeigt werden, dass vor allem die Wassergehalte der untersuchten Nadelbäume stark abgesenkt werden konnten. Dabei scheint die Tanne besonders für das System geeignet, da hier die absolut höchsten Reduktionswerte erreicht wurden. Auch Douglasie und Kiefer zeigten gute Reduktionswerte. Dabei schien auch der Ausgangswassergehalt für den zu erreichenden Endwassergehalt eine Rolle zu spielen. Bei Fichte, die den höchsten Ausgangswassergehalt aufweisen konnte, war die Wassergehaltsabsenkung zwar in relativen Prozenten ähnlich stark wie bei Douglasie, Kiefer und Tanne, jedoch wurde nicht das gleiche Endniveau erreicht wie bei den Nadelbaumarten mit geringerem Ausgangsgehalt.

Die Differenz zwischen dem erreichbaren Endwassergehalt zwischen 60 und 70 bar ist stellenweise sehr gering, lediglich bei den Laubbaumarten konnten signifikant höhere Reduktionsraten bei 70 bar nachgewiesen werden, was einen möglichen Rückschluss auf die Einflüsse der höheren Rohdichte und des kompakteren Gewebegefüges bei Buche zulässt, wo höhere Drücke möglicherweise die Wasserentfernung verbessern können.

Bei Pappel und Kiefer traten zum Teil erhebliche Probleme mit dem Einzug des Materials auf. Die Folge waren längere Durchsatz- und Ansteuerungszeiten sowie ein noch stärkeres Auffasern.

#### **5.3.2 Auswirkung auf die Schüttdichte**

Die bereits im Vorversuchsstadium abzusehenden Tendenzen konnten auch in der Hauptmessreihe bestätigt werden. Mit steigendem Pressdruck nimmt die Schüttdichte (BD) aufgrund des Gewichtsverlusts ab.

Auf einen weiteren Einflussfaktor deuten die Werte der Schüttdichte der Trockenmasse (BDd) hin.

Hier zeigt z.B. die Kiefer einen im Vergleich zu den anderen Nadelbaumarten starken Rückgang der Schüttdichte auf. Diese Tendenz kann auf die beim Pressen der Kiefer stattgefundenene starke Partikelzerfaserung zurückgeführt werden, welche das Lagerungsvolumen der Probe erhöht haben kann. Diese Tendenz wird ebenfalls von den Ergebnissen der Partikelgrößenverteilung bei Kiefer untermauert, welche sehr hohe Feingutanteile der Fraktionen <3,15 mm bis >3,15-8 mm aufweist. Dabei geht die Zerfaserung mit einem Zerkleinerungseffekt einher. Eine insgesamt ähnliche Tendenz zeigt auch die Pappel, bei der gleiche Tendenzen abzulesen sind.

Bei den anderen Baumarten nimmt die Schüttdichte der Trockenmasse ebenfalls ab, ist in der Intensität aber weniger stark. Die Zunahme des Pressdruckes von 60 auf 70 bar führt zu einem signifikant erhöhten Feingutanteil. Dies wirft erstmalig die Frage auf, ob die Verwendung des höchsten Druckniveaus sich aus materialqualitativen Gründen als negativ erweisen könnte.

### 5.3.3 Auswirkung auf die Korngrößenverteilung

Der oben beschriebene Zerfaserung und spiegelt sich in wachsenden Feingutanteilen wider. Bei Tanne, Douglasie und Fichte ist diese Tendenz am schwächsten, da sie die geringsten Feingutanteile bei 70 bar Pressdruck aufweisen. Bei Kiefer, Buche und Pappel zeigen sich die höchsten Feingutanteile, allerdings wurde das Material teils unabgesiebt verwendet, was einen höheren Anteil an Feingut im Ausgangsmaterial mit sich bringt.

Ein ansteigender Feingutanteil kann sich für einige Verwertungsoptionen als problematisch erweisen. Hier ist möglicherweise eine weitere Absiebung oder Vermischung des Pressmaterials notwendig. Die erhöhten Kosten und verminderte Gesamtproduktivität müsste in der Gesamtkalkulation des Verfahrens ggf. mit einbezogen werden.

### 5.3.4 Auswirkung auf den Heizwert

Im gleichen Zuge wie die Wassergehalte bei steigendem Pressdruck sinken, erhöhen sich die Heizwerte. Besonders bei der Fichte, aber auch bei Douglasie, Tanne und Kiefer betragen die Steigerungen zwischen 43-70%. Wie bei den Wassergehalten sind die Differenzen zwischen den Druckniveaustufen 60 und 70 bar ähnlich wie bei den Wassergehalten nur gering ausgeprägt.

### 5.3.5 Auswirkungen auf den Aschegehalt

Die Ergebnisse der Aschegehalte bei verschiedenen Druckniveaus bei den Baumarten erwiesen sich als nicht einheitlich. Während nur wenige signifikante Unterschiede bei Fichte, Douglasie, Kiefer und Buche zu verzeichnen waren, konnte vor allem bei Tanne und Pappel ein abnehmender Gesamtgehalt bei ansteigendem Pressdruck nachgewiesen werden.

Folgende Gründe sind hierfür plausibel. Erstens kann eine Art Absiebungsprozess während und nach der Pressung vorliegen. Dabei könnten z.B. einige Feingutanteile und wenig feste Rindenbestandteile während des Pressvorgangs entweder mechanisch durch die Plattenkette entfernt oder durch das ablaufende Presswasser gebunden werden. Zweitens besteht die Möglichkeit, dass durch die Entfernung des freien Wasser auch gebundene mineralische Bestandteile aus dem Verbund gelöst und ebenfalls entfernt werden.

## 5.4 Wirtschaftlichkeit

### 5.4.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Nach dem unten ausführlicher beschriebenen Beispiel wäre die Kostenstruktur der Trocknungsverfahren mit und ohne Berücksichtigung der Wärmekosten folgende:

**Tabelle 37:** Kalkulatorische Grundlagen für Wirtschaftlichkeitsberechnung

el. Leistung mech. Trock.	Durchsatz der mech. Trock.	Strom	Wärme	th. Energie- verbrauch je kg Wasser	el. Verbrauch therm Trock.
[kW]	[Srm/h]	[€/kWh]	[€/kWh]	[kWh]	[kWh/kg W.]
12,000	1,000	0,17	0,04	1,2	0,015

Energieeffizienz ist ein Maß für die Ausnutzung eingesetzter Energie. Mit möglichst wenig eingesetzter Energie soll ein bestimmtes Maß an Energiegewinn bzw. eine bestimmte Wassergehaltsreduktion durch den Trocknungsprozess im Trockengut erreicht werden.

Die eingesetzte Energie im mechanischen Trocknungsverfahren wird dargestellt (Messungen durch Strommengenähler) und auf eine Bezugseinheit (kWh/m<sup>3</sup> bzw. kWh/kg Wasser) umgerechnet. Der Energieinput in das Trocknungsverfahren lässt sich so berechnen und vergleichend darstellen. Derzeitige konventionelle thermisch-konvektiv arbeitende Trocknungsverfahren haben eine negative Energiebilanz. Der Energieinput bei der Trocknung übersteigt den erzielten Energiegewinn (vgl. Tabelle 38). Die Grundlage des Kalkulationsmodells für das konventionelle thermische Trocknungsverfahren sind Durchschnittswerte der in Kapitel 2.13 dargestellten Verfahren die bei dem Wirkungsgrad eine Schwankungsbreite zwischen 0,9 bis 2,0 kWh/kg Wasser aufwiesen. Hier wird ein Durchschnittswert von 1,20 kWh/kg Wasser angenommen. Weiterhin wird für die elektrischen Antriebe sowie Steuerung ein Wert von durchschnittlich 0,02 kWh/kg Wasser angesetzt.

**Tabelle 38:** Kalkulatorische Gegenüberstellung eines kalkulatorischen Beispiels eines konventionellen thermischen Trocknungssystems (Basiswerte für Wassergehaltsred. 60 bar Szenarios) im Vergleich zum innovativen mechanischen System mit den vergleichend dargestellten Druckniveaus von 60 und 70 bar bei den untersuchten Nadelbaumarten

Konventionelles Verfahren (thermisch)												
Baumart	Frischmasse [kg/m <sup>3</sup> ]	Anfangs- wasser- gehalt [%]	Endwasser- gehalt (60 bar) [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m <sup>3</sup> ]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[€/kg Wasser]	[€/m <sup>3</sup> ]
					Fichte	353,85	60,70	43,25	108,80	1,20	130,57	0,02
Douglaise	337,99	54,88	38,86	88,56	1,20	106,27	0,02	1,33	1,22	107,60	0,05	4,48
Kiefer	346,05	53,28	38,19	84,48	1,20	101,38	0,02	1,27	1,22	102,65	0,05	4,27
Tanne	354,29	57,61	38,27	111,00	1,20	133,20	0,02	1,66	1,22	134,86	0,05	5,61
Innovatives Verfahren (mechanisch bei 60 bar Druck)												
Baumart	Frischmasse [kg/m <sup>3</sup> ]	Anfangs- wasser- gehalt [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m <sup>3</sup> ]	Energieinput th.		Energieinput (aus Messung bei 60 bar)		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[€/kg Wasser]	[€/m <sup>3</sup> ]
					Fichte	353,85	60,70	43,25	108,80	0,00	0,00	8,87
Douglaise	337,99	54,88	38,86	88,56	0,00	0,00	6,07	0,07	6,07	0,01	1,03	
Kiefer	346,05	53,28	38,19	84,48	0,00	0,00	13,27	0,16	13,27	0,03	2,26	
Tanne	354,29	57,61	38,27	111,00	0,00	0,00	6,93	0,06	6,93	0,01	1,18	
Innovatives Verfahren (mechanisch bei 70 bar Druck)												
Baumart	Frischmasse [kg/m <sup>3</sup> ]	Anfangs- wasser- gehalt [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m <sup>3</sup> ]	Energieinput th.		Energieinput (aus Messung bei 70 bar)		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[€/kg Wasser]	[€/m <sup>3</sup> ]
					Fichte	353,85	60,70	43,58	107,37	0,00	0,00	13,47
Douglaise	337,99	54,88	38,11	91,58	0,00	0,00	6,67	0,07	6,67	0,01	1,13	
Kiefer	346,05	53,28	38,14	84,69	0,00	0,00	19,40	0,23	19,40	0,04	3,30	
Tanne	354,29	57,61	37,58	113,69	0,00	0,00	7,40	0,07	7,40	0,01	1,26	

Tabelle 38 zeigt die Gegenüberstellung eines konventionellen thermischen Trocknungsverfahrens und des untersuchten mechanischen Verfahrens (60 bar und 70 bar Variante) hinsichtlich Wasserreduktionsraten, Energieverbräuchen sowie der kalkulatorischen Energiekosten. Dies erfolgt jeweils mit dem 60 sowie dem 70 bar Druckszenarios.

Die Resultate zeigen die deutliche Überlegenheit des 60 bar Druckszenarios gegenüber 70 bar Szenario, vor allem aber gegenüber dem konventionellen thermischen Trocknungsverfahren. Dabei können die Kosten für die Trocknung in Vergleich zum konventionellen Verfahren um bis zu 4,4 Euro (Tanne) verringert werden.

Im Vergleich der 60 und 70 bar Varianten, ist die Energieaufnahme der 60 bar Variante um bis zu 34% (Fichte) geringer als die 70 bar Variante.

## 5.4.2 Mehrstufiges Verfahren / Variantenvergleich

Die am Projekt beteiligten Partner streben für den verbesserten Absatz Ihrer Sägenebenprodukte die Produktion eines auf den Wassergehalt bezogenen möglichst homogenen Hackgutsortimentes an. Da abzusehen ist, dass durch das innovative mechanische Pressverfahren zwar ein Großteil des frei vorliegenden Wassers dem Holz entzogen werden kann, dieser jedoch im Bereich von etwa 35-38% Wassergehalt kulminiert, kann die Nachbehandlung, i.d.R. mit einer thermischen Nachtrochnung notwendig sein.

Die folgenden Tabellen stellen einen Vergleich verschiedener Trocknungskonstellationen dar (rein konventionelle thermische Trocknung – Kombination mechanische und thermische Trocknung). Die Ziel-Wassergehalte betragen 25, 30 sowie 35%.

**Tabelle 39:** Variantenvergleich zwischen kombinierten mechanischen/thermischen sowie rein konventionellem Trocknungsverfahren mit einer Zielgröße von 35% Wassergehalt

Kombinationsverfahren (mechanisch + thermisch) Zielgröße 35% Wassergehalt												
Innovative mechanische Stufe (60 bar)												
Baumart	Frischmasse [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[€/kg Wasser]	[€/m³]	
Fichte	353,85	60,70	43,25	108,80	0,00	0,00	8,87		0,08	8,87	0,01	1,51
Douglaise	337,99	54,88	38,86	88,56	0,00	0,00	6,07		0,07	6,07	0,01	1,03
Kiefer	346,05	53,28	38,19	84,48	0,00	0,00	13,27		0,16	13,27	0,03	2,26
Tanne	354,29	57,61	38,27	111,00	0,00	0,00	6,93		0,06	6,93	0,01	1,18
Konventionelle thermische Stufe												
Baumart	Frischmasse (bei 60 bar) [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt (bei 60 bar) [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[€/kg Wasser]	[€/m³]
Fichte	214,23	43,25	35,00	27,19	1,20	32,63	0,02	0,41	1,22	33,04	0,05	1,37
Douglaise	236,10	38,86	35,00	14,02	1,20	16,82	0,02	0,21	1,22	17,04	0,05	0,71
Kiefer	185,19	38,19	35,00	9,09	1,20	10,91	0,02	0,14	1,22	11,04	0,05	0,46
Tanne	221,53	38,27	35,00	11,14	1,20	13,37	0,02	0,17	1,22	13,54	0,05	0,56
Innovatives Verfahren Stufen 1+2 (mechanisch + thermisch)												
Baumart	Frischmasse [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Summe Energieinput		Energiekosten		Differenz Konventionell / Innovativ (Stufe 1+2)			
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[€/kg Wasser]	[€/m³]	Reduktion Energieinput		Reduktion Energiekosten	
Fichte	353,85	60,70	35,00	139,91	1,30	41,91	0,06	2,88	128,08		4,19	40,76
Douglaise	337,99	54,88	35,00	103,37	1,28	23,11	0,06	1,74	102,49		3,48	33,31
Kiefer	346,05	53,28	35,00	97,32	1,37	24,31	0,08	2,72	93,93		2,20	55,19
Tanne	354,29	57,61	35,00	123,24	1,28	20,47	0,06	1,74	129,26		4,49	27,95
Rein Konventionelle thermische Trocknung (Zielgröße 35% Wassergehalt)												
Baumart	Frischmasse (bei 60 bar) [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt (bei 60 bar) [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/Srm]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/Srm]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/Srm]	[€/kg Wasser]	[€/Srm]
Fichte	353,85	60,70	35,00	139,91	1,20	167,89	0,02	2,10	1,22	169,99	0,05	7,07
Douglaise	337,99	54,88	35,00	103,37	1,20	124,05	0,02	1,55	1,22	125,60	0,05	5,23
Kiefer	346,05	53,28	35,00	97,32	1,20	116,78	0,02	1,46	1,22	118,24	0,05	4,92
Tanne	354,29	57,61	35,00	123,24	1,20	147,89	0,02	1,85	1,22	149,73	0,05	6,23

Das kombinierte Verfahren aus mechanischer Pressung und thermischer Nachtrochnung ist der konventionellen Trocknung bei einem Ziel-Wassergehalt von 35% deutlich überlegen. Die Kosten können durch die Verwendung des innovativen Systems um bis zu 55% reduziert werden.

**Tabelle 40:** Variantenvergleich zwischen kombinierten mechanischen/thermischen sowie rein konventionellem Trocknungsverfahren mit einer Zielgröße von 30% Wassergehalt

Kombinationsverfahren (mechanisch + thermisch) Zielgröße 30% Wassergehalt												
Innovative mechanische Stufe (60 bar)												
Baumart	Frischmasse [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[€/kg Wasser]	[€/m³]
Fichte	353,85	60,70	43,25	108,80	0,00	0,00	8,87		0,08	8,87	0,01	1,51
Douglaise	337,99	54,88	38,86	88,56	0,00	0,00	6,07		0,07	6,07	0,01	1,03
Kiefer	346,05	53,28	38,19	84,48	0,00	0,00	13,27		0,16	13,27	0,03	2,26
Tanne	354,29	57,61	38,27	111,00	0,00	0,00	6,93		0,06	6,93	0,01	1,18
Konventionelle thermische Stufe												
Baumart	Frischmasse (bei 60 bar) [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt (bei 60 bar) [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[€/kg Wasser]	[€/m³]
Fichte	214,23	43,25	30,00	40,55	1,20	48,66	0,02	0,61	1,22	49,27	0,05	2,05
Douglaise	236,10	38,86	30,00	29,88	1,20	35,86	0,02	0,45	1,22	36,31	0,05	1,51
Kiefer	185,19	38,19	30,00	21,67	1,20	26,00	0,02	0,33	1,22	26,33	0,05	1,10
Tanne	221,53	38,27	30,00	26,17	1,20	31,41	0,02	0,39	1,22	31,80	0,05	1,32
Innovatives Verfahren Stufen 1+2 (mechanisch + thermisch)												
Baumart	Frischmasse [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Summe Energieinput		Energiekosten		Differenz Konventionell / Innovativ (Stufe 1+2)		Reduktion Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[€/kg Wasser]	[€/m³]	[kWh/m³]	[€/m³]	[%-relativ]	
Fichte	353,85	60,70	30,00	155,19	1,30	58,14	0,06	3,56	130,41	4,29	45,35	
Douglaise	337,99	54,88	30,00	120,13	1,28	42,38	0,06	2,54	103,58	3,53	41,87	
Kiefer	346,05	53,28	30,00	115,09	1,37	39,60	0,08	3,35	100,23	2,47	57,60	
Tanne	354,29	57,61	30,00	139,74	1,28	38,73	0,06	2,50	131,06	4,56	35,41	
Rein Konventionelle thermische Trocknung (Zielgröße 30% Wassergehalt)												
Baumart	Frischmasse (bei 60 bar) [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt (bei 60 bar) [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/Srm]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/Srm]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/Srm]	[€/kg Wasser]	[€/Srm]
Fichte	353,85	60,70	30,00	155,19	1,20	186,23	0,02	2,33	1,22	188,55	0,05	7,84
Douglaise	337,99	54,88	30,00	120,13	1,20	144,16	0,02	1,80	1,22	145,96	0,05	6,07
Kiefer	346,05	53,28	30,00	115,09	1,20	138,10	0,02	1,73	1,22	139,83	0,05	5,82
Tanne	354,29	57,61	30,00	139,74	1,20	167,69	0,02	2,10	1,22	169,79	0,05	7,06

**Tabelle 41:** Variantenvergleich zwischen kombinierten mechanischen/thermischen sowie rein konventionellem Trocknungsverfahren mit einer Zielgröße von 25% Wassergehalt

Kombinationsverfahren (mechanisch + thermisch) Zielgröße 25% Wassergehalt												
Innovative mechanische Stufe (60 bar)												
Baumart	Frischmasse [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[€/kg Wasser]	[€/m³]	
Fichte	353,85	60,70	43,25	108,80	0,00	0,00	8,87	0,08	8,87	0,01	1,51	
Douglaise	337,99	54,88	38,86	88,56	0,00	0,00	6,07	0,07	6,07	0,01	1,03	
Kiefer	346,05	53,28	38,19	84,48	0,00	0,00	13,27	0,16	13,27	0,03	2,26	
Tanne	354,29	57,61	38,27	111,00	0,00	0,00	6,93	0,06	6,93	0,01	1,18	
Konventionelle thermische Stufe												
Baumart	Frischmasse (bei 60 bar) [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt (bei 60 bar) [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[€/kg Wasser]	[€/m³]
Fichte	214,23	43,25	25,00	52,13	1,20	62,56	0,02	0,78	1,22	63,34	0,05	2,64
Douglaise	236,10	38,86	25,00	43,63	1,20	52,36	0,02	0,65	1,22	53,01	0,05	2,21
Kiefer	185,19	38,19	25,00	32,57	1,20	39,08	0,02	0,49	1,22	39,57	0,05	1,65
Tanne	221,53	38,27	25,00	39,20	1,20	47,04	0,02	0,59	1,22	47,62	0,05	1,98
Innovatives Verfahren Stufen 1+2 (mechanisch + thermisch)												
Baumart	Frischmasse [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Summe Energieinput		Energiekosten		Differenz Konventionell / Innovativ (Stufe 1+2)		Reduktion Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/m³]	[€/kg Wasser]	[€/m³]	Reduktion Energieinput		Reduktion Energiekosten	
					[kWh/m³]	[kWh/m³]	[€/m³]	[€/m³]	[€/m³]	[%-relativ]		
Fichte	353,85	60,70	25,00	168,43	1,30	72,21	0,06	4,14	132,44	4,37	48,66	
Douglaise	337,99	54,88	25,00	134,66	1,28	59,08	0,06	3,24	104,52	3,57	47,56	
Kiefer	346,05	53,28	25,00	130,48	1,37	52,84	0,08	3,90	105,70	2,69	59,16	
Tanne	354,29	57,61	25,00	154,05	1,28	54,55	0,06	3,16	132,61	4,63	40,57	
Rein Konventionelle thermische Trocknung (Zielgröße 25% Wassergehalt)												
Baumart	Frischmasse (bei 60 bar) [kg/m³]	Anfangs- wassergehalt (bei 60 bar) [%]	Endwasser- gehalt [%]	Abzutrocknende Wassermasse [kg/m³]	Energieinput th.		Energieinput el.		Summe Energieinput		Energiekosten	
					[kWh/kg Wasser]	[kWh/Srm]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/Srm]	[kWh/kg Wasser]	[kWh/Srm]	[€/kg Wasser]	[€/Srm]
Fichte	353,85	60,70	25,00	168,43	1,20	202,12	0,02	2,53	1,22	204,65	0,05	8,51
Douglaise	337,99	54,88	25,00	134,66	1,20	161,59	0,02	2,02	1,22	163,61	0,05	6,81
Kiefer	346,05	53,28	25,00	130,48	1,20	156,58	0,02	1,96	1,22	158,54	0,05	6,60
Tanne	354,29	57,61	25,00	154,05	1,20	184,85	0,02	2,31	1,22	187,17	0,05	7,79

Wie in Tabelle 40 und Tabelle 41 zu sehen, zeigt sich auch hier das innovative zweistufige Trocknungssystem deutlich dem rein konventionellen System überlegen. Die Reduktion der Energiekosten liegt im Schnitt bei ca. 50%.

Das vorgestellte Verfahren kann also auch in Kombination mit einer thermischen Nachrocknung eine wirtschaftliche Alternative darstellen kann.

### 5.4.3 Stückkostenkalkulation

Das folgende Kalkulationsbeispiel vergleicht das innovative Verfahren (einstufig mechanische) mit einem angenommenen konventionellen (thermischen) Verfahren.

Die angesetzten Basisdaten spiegeln dabei die betrieblichen Szenarien und Kalkulationsgrundlagen der beteiligten Partner wider.

**Tabelle 42:** Stückkostenkalkulation von mechanischen sowie eines kalkulatorischen Beispiels für eine thermische Trocknung am Beispiel der Baumart Fichte (Parameter aus Druckniveau 60 bar)

	Mechanische Trocknung	Thermische Trocknung	Einheit
	Ausgangsdaten		
Anschaffungspreis	70.000	170.000	€
Nutzungsdauer (a)	15	15	Jahre
Gesamtlaufzeit 10 Jahre	120000	120000	Stunden/10 a
	8000	8000	Stunden/a
kalkulatorische Zinsen	4	4	%
Instandhaltung/Jahr	5	5	% vom Anschaffungspreis
Energiekosten Wärme	0	0,04	€/kWh
Energiekosten Strom	0,17	0,17	€/kWh
Motorleistung (kW), Vortrieb, Lüftung	12	8	kW
durchschnittl. Leistungsaufnahme/a	80	80	%
Personalaufwand	1	1	Stunden/Tag
Personalaufwand/a	250	250	
Personalkosten (incl. Nebenkosten)	30	30	€/Stunde
Gesamtkosten Personal	7500	7500	€/Jahr
Raumanteil der Maschine (m <sup>2</sup> )	50	80	m <sup>2</sup>
Raumkosten/m <sup>2</sup> /a (intern)	40	40	€/m <sup>2</sup> /a
<i>Durchsatz</i>	1	5	Srm/h
<i>Zu trocknende Restwassermenge/Srm</i>		108,8	l/Srm
<i>Zu trocknende Restwassermenge/h</i>		544	l/h
<i>Effizienz thermisches TV</i>		1,2	kWh/kg Wasserverdampfung
<b>Fixkosten</b>			
Abschreibung	0,58	1,42	€/h
Verzinsung	0,01	0,03	€/h
Unterbringung	0,25	0,40	€/h
Summe	<b>0,85</b>	<b>1,85</b>	<b>€/h</b>
	<b>0,85</b>	<b>0,37</b>	<b>€/Srm</b>
<b>Variable Kosten</b>			
Energiekosten (Wärme)	0,00	26,11	€/h
Energiekosten (Strom)	1,63	1,09	€/h
Instandhaltung	0,44	1,06	€/h
Löhne	0,94	0,94	€/h
Summe	<b>3,01</b>	<b>29,20</b>	<b>€/h</b>
	<b>3,01</b>	<b>5,84</b>	<b>€/Srm</b>
	<b>3,85</b>	<b>31,05</b>	<b>€/h Trocknung</b>
<b>Gesamt (fixe + variable Kosten)</b>	<b>3,85</b>	<b>6,21</b>	<b>€/Srm</b>
	13056	8704	Stromkosten €/a
	1,632	0,2176	Stromkosten €/Srm

Anmerkungen:

- Mit steigender mechanischer Trocknungsleistung und Materialdurchsatz (innovatives Verfahren) sinken der proportionale Energiebedarf und damit die Energiekosten für die Trocknung
- Die Energiebilanz bei konventionellen Verfahren im Vergleich zum mechanischen Verfahren weniger gut

- Die Trocknungskosten belaufen sich in diesem Beispiel beim innovativen Verfahren auf 3,85 €/Srm. Momentan werden für ungetrockneten Hackschnitzel ein Preis von ca. 17 €/Srm frei Sägewerk erzielt (BOHNERT 2013). Um die Trocknungskosten zu decken, müsste demnach ein Mindestpreis für das getrocknete Material um 20,85 € erzielt werden. Erst danach würde der Kostendeckungspunkt überschritten und sich ein positiver Deckungsbeitrag einstellen.

Im Vergleich liegen die Trocknungskosten beim konventionellen Verfahren bei 6,21 €/Srm. Um die Trocknungskosten hier zu decken wäre ein Preis von 23,21 €/Srm zu erzielen. Ausgehend vom mittleren Hackschnitzelpreisindices für 2012 von CARMEN e.V. (2013), beträgt der Hackgutpreis für 1 tonne lutro Hackgut (WG 35) bei ca. 92 Euro. Da die maximal erreichbaren Werte für das mechanische Trocknungssystem etwas höher liegen (ca. 38%) werden für die folgenden Berechnungen nochmals zwei Euro abgezogen. Durch die Verwendung eines Umrechnungsfaktors für Industriehackgut von Srm auf t lutro von 3,77 (Austrian Energy Agency, 2009) ergibt sich ein Preis von etwa 24 Euro pro Srm.

## 5.5 Rückschlüsse aus der Presswasseranalytik

### 5.5.1 Abwasserentsorgung

Soll das Presswasser aus Holzhackschnitzeln als Abwasser entsorgt werden, gibt es, wie eingangs beschrieben, die Möglichkeit einer genehmigungsbedürftigen Direkteinleitung in ein Fließgewässer oder die Möglichkeit der Abgabe an eine kommunale Abwasserbehandlungsanlage, die Indirekteinleitung, entweder über das öffentliche Kanalnetz oder als Anlieferung des Abwassers an die Kläranlage direkt.

Für die Genehmigung einer **Direkteinleitung** gelten Emissionsgrenzwerte entsprechend der branchenspezifischen Anhänge der Abwasserverordnung. Für das innovative Verfahren der mechanischen Trocknung von Hackschnitzel gibt es keine Übereinstimmung mit einen der branchenspezifischen Anhänge. Aus diesem Grund dient Anhang 13 Holzfaserplatten der Abwasserverordnung mit den entsprechenden Emissionsgrenzwerten (Tabelle 19) lediglich als Orientierung. Bei den angegebenen Grenzwerten handelt es sich um produktionsspezifische Anforderungen, die sich auf die Produktionskapazität an Faserplatten in 0,5 Stunden (für eine qualifizierte Stichprobe) oder in 2 Stunden (für eine 2-Stunden-Mischprobe) beziehen. Sogenannte Schadstofffrachten errechnen sich aus dem Produkt der gemessenen Konzentration und des mit der Probenahmezeit (2 Stunden) korrespondierenden Abwasservolumens. Die Werte für die Schadstofffrachten werden auf eine Tonne eingesetzten Materials bezogen. Im kontinuierlichen Press-Betrieb mit 60 bar ist pro Stunde bestenfalls mit einem Durchsatz von einem Schüttraummeter (Srm) Nadelholz-Hackschnitzel zu rechnen (Kapitel 3.3.3). Entsprechend der Nadelholzart konnte der Presswasser-Anfall pro Schüttraummeter Hackschnitzel ermittelt werden (Tabelle 38), damit ergeben sich innerhalb von zwei Stunden die in Tabelle 43 dargestellten Presswasser-Volumina. Die Schadstofffrachten für die in Anhang 13 geforderten Parameter BSB<sub>5</sub>, CSB, Phenol-Index und AOX lassen sich nun mit Hilfe dieser Presswasser-Volumen und der Analysenwerte (Tabelle 35) berechnen.

Die in Tabelle 43 errechneten Werte beziehen sich nun auf zwei Schüttraummeter Hackschnitzel während zweistündiger, kontinuierlicher Pressdurchläufe bei 60 bar.

**Tabelle 43:** Schadstofffrachten für CSB, BSB<sub>5</sub>, Phenol-Index und AOX, bezogen 2 Srm Hackschnitzel während 2 Std.-Mischprobe in der Hauptmessreihe

Hack-schnitzel - Holzart	Abwasser-volumen nach 2 Std. in [l]	Analysewerte für chemische Parameter in [mg/l]				Schadstofffracht bezogen auf 2 Srm Hackschnitzel in 2 Std.-Mischprobe			
		CSB	BSB <sub>5</sub>	Phenol-Index	AO X	CSB in [kg]	BSB <sub>5</sub> in [kg]	Phenol-Index in [g]	AOX in [g]
Douglasie	177,1	29000	8020	130	5,8	5,14	1,42	23,0	1,03
Fichte	217,6	19000	4100	60	4	5,16	0,89	13,1	0,87
Kiefer	169,0	25000	99	30	4	4,23	0,017	5,1	0,68
Tanne	222,0	15000	5700	59	4	3,33	1,27	13,1	0,89

Für den Vergleich mit den im Anhang 13 geforderten Emissionsgrenzwerten für die Schadstofffrachten (Tabelle 19) sind die ermittelten Schadstofffrachten auf eine Tonne Hackschnitzel zu beziehen. Die Angaben für die Massen der verschiedenen Hackschnitzel pro Schüttraummeter können Tabelle 38 entnommen werden. Damit ergeben sich in Tabelle 44 folgende Werte für die Schadstofffrachten bezogen auf eine Tonne Hackschnitzel. Im Falle einer Überschreitung der Grenzwerte sind diese rot markiert.

**Tabelle 44:** Schadstofffrachten für CSB, BSB<sub>5</sub>, Phenol-Index und AOX, bezogen auf eine Tonne Hackschnitzel pro Holzart

Hackschnitzel - Holzart	Masse Hack-schnitzel für 2 Srm in [kg]	Schadstofffracht bezogen auf 1 t Hack-schnitzel			
		CSB in [kg/t]	BSB <sub>5</sub> in [kg/t]	Phenol-Index in [g/t]	AOX in [g/t]
(Emissions-grenzwerte nach Anhang 13 AbwV)		(1)	(0,2)	(0,3)	(0,3)
Douglasie	676,0	7,60	2,10	34,02	1,52
Fichte	707,7	7,29	1,26	18,51	1,23
Kiefer	692,1	6,11	0,025	7,39	0,98
Tanne	708,6	4,70	1,79	18,49	1,26

Bemerk.: In Rot markiert sind Überschreitungen der Emissionsgrenzwerte nach Anhang 13 AbwV

Die Schadstofffrachten der Presswasser von Holzhackschnitzel können die Anforderungen von Anhang 13 der Abwasserverordnung überwiegend nicht einhalten und überschreiten diese um ein Vielfaches. Allerdings geben diese Anforderungen nur eine Orientierung, da Anhang 13 für die Herstellung von Holzfasernplatten und nicht für die Pressung von Hackschnitzel gilt. Das Amt für Gewerbeaufsicht als zuständige Rechtsbehörde kann hier im Einzelfall die Grenzwerte festlegen.

Aus dem Vergleich der ermittelten Schadstofffrachten in den Presswasser mit den Vorgaben von Anhang 13 kann aber der Schluss gezogen werden, dass allein schon aufgrund der sehr hohen CSB- und BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen eine Genehmigung zur Direkteinleitung nicht erteilt werden würde. Eine vorgeschaltete biologische Abwasserreinigung der Presswasser könnte

eine deutliche Reduzierung der Schadstofffrachten bewirken und damit vielleicht eine Direkteinleitung ermöglichen. Hierfür sind aber weitere Untersuchungen notwendig.

Die Indirekteinleitung, die Abgabe des Abwassers an eine kommunale Abwasserbehandlungsanlage, stellt die Alternative zur Direkteinleitung bei der Abwasserentsorgung dar. Gemäß Indirekteinleitungsverordnung (IndVO) gelten für Abwasser nicht-häuslicher Herkunft ebenfalls die Anforderungen der Abwasserverordnung. Die Indirekteinleitung von Abwasser aus einem industriellen oder gewerblichen Betrieb, der im Anhang 1-57 der Abwasserverordnung genannt wird, bedarf einer Genehmigung der unteren Wasserbehörde.

Bei einem Presswasseraufkommen von rund 2 m<sup>3</sup>/Tag an 5 Tagen in der Woche besteht nach der Indirekteinleitungsverordnung keine Genehmigungspflicht, was von der unteren Wasserbehörde bestätigt wurde.

Entfällt die Genehmigungspflicht nach der IndVO, sind die Gemeinden vor Ort für die Indirekteinleitung zuständig und können in kommunalen Abwassersatzungen ergänzende Anforderungen an das Abwasser festlegen. Eine schriftliche Genehmigung ist hier auch erforderlich.

Entscheidend für die Genehmigung und die Gebühren einer Indirekteinleitung sind zum einen die Inhaltsstoffe, also die Höhe und Art der organischen Belastung, die biologische Abbaubarkeit, die Art und Konzentration toxisch wirkender Stoffe (z.B. manche phenolische Verbindungen) und der Gehalt von Schwermetallen, und zum anderen die Menge und der Anfallort des Abwassers.

Die Gemeinden können Indirekteinleitungen von Abwasser ausschließen, um Beeinträchtigungen der Reinigungsleistung der öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen zu verhindern, und Grenzwerte für die Abwasser-Inhaltsstoffe festlegen. Die Gemeinden Nordrach und Seebach beispielsweise fordern für Abwasser zur Indirekteinleitung in ihren Abwassersatzungen die Einhaltung der Richtwerte des Anhangs A.1 des Merkblatts DWA-M 115-2 vom Juli 2005 (Tabelle 18). Im Anhang A.1 dieses Merkblatts werden Richtwerte für eine Vielzahl von Abwasserparametern angegeben. Eine Auswahl von Parametern ist in Tabelle 45 aufgelistet.

**Tabelle 45:** Auswahl von Parametern und deren Richtwerte aus Anhang A.1 des Merkblatts DWA-M 115-2 vom Juli 2005 (Hrsg./Vertrieb: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA – Theodor-Heuss-Allee 17, 53773 Hennef)

Parameter	Richtwert	Bemerkung
pH-Wert	6,5 – 10,0	aufgrund der Arbeitssicherheit und Funktionsfähigkeit der öffentlichen Abwasseranlage
AOX	1 mg/l	höhere Werte können widerruflich zugelassen werden, wenn u.a. keine Gefahr für den Betrieb, des Personals oder des Gewässers besteht
Phenol-Index	100 mg/l	gilt für halogenfreie phenolische Verbindungen. Für toxische und schwer abbaubare Phenole sind im Einzelfall gesonderte Grenzwerte festzulegen
Quecksilber	0,1 mg/l	
Blei	1 mg/l	
Cadmium	0,5 mg/l	
Chrom	1 mg/l	
Kupfer	1 mg/l	
Nickel	1 mg/l	
Zink	5 mg/l	
Eisen	-	keine Begrenzung
Stickstoff aus Ammonium und Ammoniak	100mg/l oder 200 mg/l	Richtwert hängt von der Größe der Abwasserreinigungsanlage ab: 100 mg/l gilt für Kläranlagen (KA) ≤ 5000 EW, 200mg/l für KA > 5000 EW
Phosphor, gesamt	50 mg/l	höhere Werte können zugelassen werden, sofern der Betrieb der Abwasseranlagen dies erlaubt
Aerobe biologische Abbaubarkeit	-	Kein Richtwert, aber Überwachung mit dem genormten Test wird von den Indirekteinleitern gefordert, wenn Probleme auf der kommunalen KA aufgrund der Zusammensetzung des Abwassers zu erwarten sind.

### 5.5.2 Organische Belastung und biologische Abbaubarkeit der Presswasser

Liegen die CSB-Werte deutlich über den BSB<sub>5</sub>-Werten (Abbildung 82) und die Verhältnisse von CSB zu BSB<sub>5</sub> signifikant über 1.5, deutet dies in der Regel auf schwer abbaubare organische Verbindungen hin. Phenolische Verbindungen könnten dafür verantwortlich sein. Dementsprechend zeigt das Presswasser der Douglasien-Hackschnitzel mit dem höchsten CSB-Wert einen sehr hohen Phenol-Index von 130 mg/l. Bei allen anderen Presswassern trifft diese Korrelation nicht zu. Phenol ist eine chemische Gruppenbezeichnung für aromatische Hydroxyl-Verbindungen des Benzols, zu denen schwer abbaubare Substanzen mit biozider Wirkung, aber auch andere leicht abbaubare Verbindungen zählen. Die biologische aerobe Abbaubarkeit der Presswasser zeigen die Ergebnisse des Zahn-Wellen-Tests in Abbildung 84. Entsprechend der Werte für CSB und Phenol-Index weist das Presswasser der Douglasien-Hackschnitzel eine deutlich niedrigere Abbaubarkeit von 82 % auf. Das Presswasser der Tannen-Hackschnitzel mit 92 % und das der Fichten-Hackschnitzel mit 90 % hingegen sind sehr gut biologisch abbaubar. Das Presswasser der Douglasien-Hackschnitzel

überschreitet auch als einziges Presswasser den in den Abwassersatzungen geforderten Richtwert für den Phenol-Index von 100 mg/l.

### 5.5.3 Adsorbierbare, organisch gebundene Halogene (AOX)

Während die AOX-Werte der Presswasser von Pappel-, Fichten-, Kiefern- und Tannen-Hackschnitzel unterhalb der Messgrenzen von 2 mg/l bzw. 4 mg/l liegen, überschreitet der AOX-Gehalt des Presswassers von Douglasien-Hackschnitzeln mit 5,8 mg/l den in den Abwassersatzungen geforderten Richtwert (Tabelle 35). Die Gemeinden können aber höhere AOX-Werte für die Indirekteinleitung im Einzelfall zulassen, wenn keine Gefährdung des Betriebs der Kläranlage, des Personals und des Gewässers zu erwarten ist.

### 5.5.4 Schwermetalle

Wie in Tabelle 35 und in Abbildung 88 erkennbar ist, werden die Richtwerte für die Schwermetalle weitgehend eingehalten. Ausnahmen treten bei den Presswassern der Pappel-Hackschnitzel und der Fichten-Hackschnitzel auf. Das Presswasser der Pappel-Hackschnitzel enthält einen deutlich höheren Zinkgehalt mit 9,8 mg/l und einen erhöhten Kupfergehalt mit 1,9 mg/l, was möglicherweise auf den Wuchsstandort der Pappel zurückzuführen ist. Das Presswasser der Fichten-Hackschnitzel überschreitet die Richtwerte für Blei mit einer Konzentration von 1,2 und für Zink mit einem Wert von 5,7 nur unwesentlich.

### 5.5.5 Nährstoffparameter: Stickstoff und Phosphor

Aufgrund der niedrigen pH-Werte der Presswasser ist nicht mit hohen Konzentrationen des fischgiftigen Ammoniaks zu rechnen. Das chemische Gleichgewicht von Ammoniak und Ammonium verschiebt sich bei niedrigen pH-Werten in Richtung Ammonium. Aber auch die gemessenen Ammonium-Konzentrationen der Presswasser (Tabelle 35, Abbildung 87) liegen weit unterhalb der geforderten Richtwerte von 100 mg/l bzw. von 200 mg/l (Tabelle 45).

Phosphor liegt entweder gelöst im Wasser als Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) oder als organisch gebundener Phosphor vor. Für den gesamten Phosphorgehalt ( $\text{P}_{\text{gesamt}}$ ) werden beide Formen zusammen analysiert. (GUJER, 2007, S.44) Der Richtwert für  $\text{P}_{\text{gesamt}}$  mit 50 mg/l (Tabelle 45) wird nur vom Presswasser der Pappel weit überschritten.

### 5.5.6 pH-Wert

Der pH-Wert ist einerseits für das Milieu der Mikroorganismen in der biologischen Abwasserreinigungsanlage entscheidend und andererseits für Korrosion von Betonteilen (z.B. Kanalsystem, Bauteile einer Kläranlage) verantwortlich. Alle pH-Werte der Presswasser können die Vorgaben der Abwassersatzungen nicht erfüllen, sondern liegen im deutlich sauren Bereich. Abhilfe kann hier durch die Zugabe von Kalk oder Natronlauge geschaffen werden, was aber permanente Kontrollen und dosierte kontinuierliche Zugaben der Chemikalien erforderlich machen.

### 5.5.7 Schlussbetrachtung zur Abwasserentsorgung

Der hohe Gehalt an organischen und phenolischen Verbindungen wie auch die hohen AOX-Konzentrationen der Presswasser von Holzhackschnitzel macht eine Genehmigung für die **Direkteinleitung** ohne vorgeschaltete Reinigungsstufe unwahrscheinlich. Als vorgeschaltete Reinigung sind zwar extensive Abwasserreinigungsmethoden denkbar, aber aufgrund des Flächenbedarfs für Klärteiche oder Pflanzenfilter nicht in jedem Fall umsetzbar. Für eingeschränkte Platzverhältnisse könnten zur Abscheidung von Trübstoffen beispielsweise Neutralisations- und Flockungsanlagen in Form von winterfesten Containern dienen. Optional kann hier der pH-Wert durch Zugabe von CO<sub>2</sub> eingestellt werden. Ebenso könnten Trommelfilter zur Reduzierung des Schwebstoffgehalts eingesetzt werden.

Anforderungen für die **Indirekteinleitung** der Presswasser in das Kanalnetz oder durch Anlieferung an eine öffentliche Abwasserreinigungsanlage werden von den entsprechenden Gemeinden in Abwassersatzungen definiert. Diese Anforderungen können von Kommune zu Kommune variieren und richten sich nach der Reinigungsleistung und Größe der örtlichen Kläranlage. Eine Genehmigung ist erforderlich. Indirekteinleitung in das öffentliche Kanalsystem ist außerdem mit den entsprechenden Verbandskläranlagen und den Kanalnetzbetreibern zu klären.

Das Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz empfiehlt für die Indirekteinleitung der Presswasser eine gedrosselte Einleitung nur bei Trockenwetter, um bei Starkregenereignissen eine Gewässerbelastung durch Regenüberläufe zu vermeiden. Dies setzt einen Zwischenspeicher für das Zurückhalten der Presswasser für einen Tag voraus.

In Rücksprache mit den zuständigen Verantwortlichen der Verbandskläranlage Achertal-Kappelrodeck ist eine Indirekteinleitung möglich.

Die Kosten für die Einleitung bestimmt die Gemeinde Seebach. Sie liegen in Höhe von häuslichem Abwasser bei 2,35 €/m<sup>3</sup>. Als Vorschlag für die Erprobungsphase des kontinuierlichen Betriebs der Pressung von Hackschnitzel wurde eine Pauschalabrechnung für eine vereinbarte Zeitspanne genannt. Nach dieser Zeitspanne muss ein Abwasserzähler installiert werden.

Gemäß Aussagen der zuständigen Verantwortlichen der Verbandskläranlage Biberach Kinzig-Harmersbach gibt es für die Abgabe der Presswasser zwei Möglichkeiten: die Direktanlieferung an die Kläranlage oder die Abgabe an das Kanalnetz. In beiden Fällen ist der pH-Wert des Abwassers mittels Zugabe von Natronlauge anzuheben.

Bei Direktanlieferung entstehen maximale Kosten von 80 €/m<sup>3</sup>, falls das Abwasser biologisch nicht abbaubar ist. Kann es direkt in der Schlammbehandlung zur Methangewinnung verwendet werden, fallen keine Kosten an. Dies wird auf der Anlage direkt geprüft. Nach dem Ergebnis richten sich die anfallenden Kosten.

Bei Einspeisung in das Kanalnetz sind mit Kosten von ca. 25 €/m<sup>3</sup> zu rechnen.

### 5.5.8 Stoffliche Verwertung der Presswasser

Zur Beurteilung der Qualität der Holzhackschnitzel-Presswasser hinsichtlich ihrer stofflichen Verwertung für die chemische Industrie oder als Riech- und Duftstoffe wurden die Presswasser gaschromatographisch getrennt und massenspektrometrisch analysiert. Viele Einzelsubstanzen konnten identifiziert und halbquantitativ ausgewertet werden (Tabelle 36).

Beim Presswasser aus unbehandelten Holzhackschnitzeln handelt es sich allerdings um einen „Cocktail“ aus unterschiedlichen Holzextraktstoffen in verschiedenen Konzentrationen, abhängig von der eingesetzten Holzart. Dieses Extrakt-Gemisch müsste zur stofflichen Verwertung weiter aufgetrennt und aufkonzentriert werden. Die Aufbereitung der Presswasser war nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes.

Um aber Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung und Extrahierung der Holzhaltsstoffe treffen zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig. Presswasserproben wie auch die Analyseergebnisse des GC-MS-Screenings könnten zusätzlich Vertretern der chemischen, pharmazeutischen, Aroma- und Kosmetikindustrie zu unternehmensinterner Prüfung zur Verfügung gestellt werden.

Weiterhin könnte geprüft werden, inwieweit die Presswasser in Biogasanlagen eingesetzt werden können. Speicherung und Transport der Presswasser wären mit diesem Einsatz verbunden und müssten sowohl energetisch wie ökonomisch betrachtet werden.

## 6 Fazit

Basierend auf den Ergebnissen der physikalischen Hackgutanalysen stellt sich das neu entwickelte Verfahren in dem Bereich der Wassergehaltsabsenkung und der damit einhergehenden Heizwertsteigerung als ein in jeder Sicht funktionales System dar. Die mechanische Holz Trocknung weist sich dabei neben einer guten verfahrenstechnischen Effektivität im Vergleich mit konventionellen Trocknungsverfahren ebenfalls als ein Verfahren mit einer vergleichsweise ausgesprochen hohen Energieeffizienz aus. Für den zukünftigen Einsatz der Technik sind vor allem ein industrietaugliches Upscaling der Presstechnik sowie die Prozessintegration als alleiniges oder vorgeschaltetes Trocknungssystem notwendig. Da hierbei nicht mit einer rein linearen Veränderung der qualitätsbestimmenden Parameter zu rechnen ist, besteht ein weiterer erheblicher Forschungsbedarf vor Eintritt in eine weitere (vor-) wettbewerbliche Phase.

Die Abwasserentsorgung stellt nicht nur aus kostentechnischer Sicht einen wichtigen Teilaspekt dar. Die erzeugten Abwassermengen müssen vorgabengetreu behandelt werden. Da dies je nach Landkreis unterschiedlich erfolgt, können im Rahmen dieses Projektes keine allgemeingültigen Vorgehensweisen und einheitliche Kostensätze angesetzt werden. Weiterhin fiel bei der untersuchten Anlage zu wenig Presswasser in zu langen Zeiträumen an, so dass eine repräsentative Analyse nicht möglich war. Hier bedarf es einer begleitenden Untersuchung im Kontext des industriellen Upscaling. Es konnten zumindest auf Ebene der befragten Behörden kosteneffiziente Möglichkeiten der Behandlung aufgezeigt werden. Diese gelten jedoch vor dem Hintergrund der erhobenen und in ihrer Aussagekraft begrenzten Daten. Eine potenzielle wirtschaftliche Sekundärnutzung des Presswassers kann dabei als weitere zukünftige Forschungsfrage identifiziert werden.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammensetzung des Entwicklungskonsortiums .....	10
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Wassergehalt (SCHARDT, 2006) .....	12
Abbildung 3: Holzdichten nach WITTKOPF (KOLLMANN, 1982) .....	13
Abbildung 4: Trocknungsgeschwindigkeit hygroskopischer Stoffe (GOLSER et.al., 2005, S. 16).....	16
Abbildung 5: H,x Diagramm nach Mollier (KALTSCHMITT, 2009, S. 317) .....	17
Abbildung 6: Spezifischer Strömungswiderstand verschiedener Hackgutfraktionen von 5 - 25 mm (WEINGARTMANN, 1991).....	18
Abbildung 7: Zusammenhang von Wassergehalt und Heizwert je Gewichtseinheit (HARTMANN, 2007, S. 58).....	20
Abbildung 8: Heizwert je Gewichtseinheit im Vgl. zur Volumeneinheit (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 2011).....	20
Abbildung 9: Beginnender Schwelbrand im Außenlager, Glutherd (CARMEN; TECHNOLOGIE UND FÖRDERZENTRUM; Merkblatt 01/07).....	21
Abbildung 10: Temperatur- und Wassergehaltsansprüche holzabbauender Pilze (KALTSCHMITT, 2009, S. 288) .....	22
Abbildung 11: Abhängigkeiten wichtiger brennstofftechnischer Eigenschaften vom Wassergehalt (KALTSCHMITT, 2009) .....	26
Abbildung 12: Übersicht Trocknungsverfahren .....	29
Abbildung 13: Lagerhalle mit durchlässigem Boden zur erleichterten Selbstdurchlüftung (HARTMANN 2007, S. 52 und WITTKOPF, 2009, S. 2) .....	31
Abbildung 14: Trocknung durch Selbsterwärmung im Haufwerk (nach BRUMMACK, 2008) .....	32
Abbildung 15: Verpilzte Kondensationszone bei Haufentrocknung (WITTKOPF, 2009, S. 2) .....	32
Abbildung 16: Solartrocknung (GOLSER 2005, S. 80) .....	33
Abbildung 17: Solartrocknungssystem der Firma Cona (www.solar.cona.at) .....	33
Abbildung 18: Cona Solartrocknungssystem (www.cona.at) .....	33
Abbildung 19: Anordnung der Belüftungsschächte bei Satzrocknern (HARTMANN, 2007, S. 54).....	34
Abbildung 20: Satzrocknung im Schema (WAGNER, 2010) .....	37
Abbildung 21: Satzrocknung als Containertrockner (HARTMANN, 2007, S. 54).....	37
Abbildung 22: KWK-Trocknungsboden (AGROENERGIEN 2011).....	38
Abbildung 23: Wagentrocknung (SCHULZ, 2007, S. 10) .....	38
Abbildung 24: Bauweise eines Wagentrockners als Seitwärtskipper (HARTMANN, 2007, S. 54) .....	38
Abbildung 25: Schubwendetrockner (WAGNER, 2010) .....	40
Abbildung 26: Funktionsweise des Schubwendetrockners (Werkbild Fa. Stela) .....	40
Abbildung 27: Schubwendetrockner im Betrieb (Werkbild Fa. RIELA) .....	40
Abbildung 28: Schubwendetrockner mit im Einsatz befindlichem Wendewerk .....	41
Abbildung 29: Bandrockner (SCHULZ, 2007, S. 11) .....	42
Abbildung 30: Bandrockner, 3-stöckig; Mobiler Einbandrockner (Werkbild RIELA) .....	42
Abbildung 31: Trommeltrockner stationär und mobil .....	43
Abbildung 32: Schema Trommeltrockner (SCHULZ, 2007, S. 26) .....	43
Abbildung 33: Schneckentrockner ( <a href="http://energieberatung.ibs-hlk.de/images/koeb_vortrockner.jpg">http://energieberatung.ibs-hlk.de/images/koeb_vortrockner.jpg</a> ) ..	44

Abbildung 34: Eberl-Hackschnitzeltrockner ( <a href="http://www.eberl-trocknungsanlagen.de">www.eberl-trocknungsanlagen.de</a> ) .....	47
Abbildung 35: Mühlböck Hackgut- und Spänetrockner (Werkbild Mühlböck Trocknungstechnik).....	48
Abbildung 36: Trocknungsanlage CDT 500 (Werkbild ggm Industries) .....	49
Abbildung 37: Schubbodentrockner ( <a href="http://www.holzenergiehof.com/lunzner/schubbodentrockner.jpg">http://www.holzenergiehof.com/lunzner/schubbodentrockner.jpg</a> ) .....	49
Abbildung 38: Schema der Trocknungsapparatur (nach YOSHIDA et al., 2010) .....	59
Abbildung 39: Erster Prototyp mechanische Trocknungseinheit (InnoDry, 2011).....	61
Abbildung 40: Vibrorinne (FNR, 2007, S. 116).....	62
Abbildung 41: Erste Konstruktionszeichnung: Front- und Seitenansicht des mechanischen Presssystems mit Kettenförderung (InnoDry, 2011) .....	63
Abbildung 42: CAD-Darstellung des Prototyps mit Antriebsaggregat (rot) (InnoDry, 2011) .....	63
Abbildung 43: CAD-Darstellung des weiter entwickelten Prototypen mit Antriebsaggregaten (rot) (InnoDry 2011).....	64
Abbildung 44: Hackgut nach Verlassen der Presszone (FOCKE, 2012) .....	65
Abbildung 45: Zuführung des Hackgutes über Vibrorinne (FOCKE, 2012).....	65
Abbildung 47: Statischer Pressversuch mit mechanischer Presse auf glatter Oberfläche (FOCKE, 2012) .....	65
Abbildung 46: Statischer Pressversuch mit mechanischer Presse auf geriffelter Oberfläche (FOCKE, 2012) .....	65
Abbildung 48: Material nach (links) und vor der Pressung (rechts) (FOCKE 2013).....	67
Abbildung 49: Zuführung des Hackgutes über die Vibrorinne auf die durchgehende Plattenkette (FOCKE, 2013).....	68
Abbildung 50: Homogenisierte Einzelprobe von 121 l (FOCKE, 2013) .....	68
Abbildung 51: Durchführung eines Pressdurchganges, Materialzufuhr in die Presszone (FOCKE, 2013) .....	70
Abbildung 52: Materialauswurf nach der Pressung in der Presszone (FOCKE, 2013) .....	70
Abbildung 53: Ablauf des Presswassers im Vorversuch (FOCKE, 2013) .....	73
Abbildung 54: Entwicklung der Wassergehalte bei der Sonderversuchsreihe sowie der Versuche mit der Walzenpresse .....	77
Abbildung 55: Entwicklung der Wassergehalte beim Vorversuch (Teil 1).....	78
Abbildung 56: Darstellung der relativen prozentualen Wassergehaltsabsenkung im Vorversuch (Teil 1) .....	78
Abbildung 57: Darstellung der Entwicklung der Wassergehalte beim Vorversuch (Teil 2) .....	79
Abbildung 58: Darstellung der relativen prozentualen Wassergehaltsabsenkung im Vorversuch (Teil 2).....	79
Abbildung 59: Darstellung der Entwicklung der Schüttdichte (BD) sowie der Schüttdichte der Trockenmasse (BDd) im Vorversuch Teil 2 .....	80
Abbildung 60: Darstellung der Entwicklung der Wassergehalte im Vorversuch Teil 3 .....	81
Abbildung 61: Darstellung der Entwicklung der Schüttdichte (BD) sowie der Schüttdichte der Trockenmasse (BDd) im Vorversuch Teil 3 .....	81
Abbildung 62: Entwicklung der Wassergehalte bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten.....	82
Abbildung 63: Entwicklung der Schüttdichte (BD, im jeweiligen Zustand) bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten .....	84

Abbildung 64: Entwicklung der Schüttdichte (BDd, Trockenmasse) bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten .....	84
Abbildung 65: Hackgutpartikel nach der Pressung .....	85
Abbildung 66: Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Fichte bei ansteigendem Druckniveau...	85
Abbildung 67: Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Douglasie bei ansteigendem Druckniveau .....	86
Abbildung 68: Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Kiefer bei ansteigendem Druckniveau ...	86
Abbildung 69: Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Tanne bei ansteigendem Druckniveau ..	87
Abbildung 70: Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Buche bei ansteigendem Druckniveau ..	87
Abbildung 71: Entwicklung der Partikelgrößenverteilung der Pappel bei ansteigendem Druckniveau ..	88
Abbildung 72: Entwicklung der Heizwerte (mit jeweiligem Wassergehalt) bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten .....	89
Abbildung 73: Entwicklung der Brennwerte bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten .....	90
Abbildung 74: Entwicklung der Aschegehalte der Trockenmasse bei ansteigendem Druckniveau nach Baumarten.....	91
Abbildung 75: Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Fichte .....	92
Abbildung 76: Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Douglasie.....	92
Abbildung 77: Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Kiefer.....	93
Abbildung 78: Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Tanne .....	93
Abbildung 79: Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Buche .....	94
Abbildung 80: Entwicklung der Wassergehaltsreduktion im Verhältnis zur Energieaufnahme bei Baumart Pappel .....	94
Abbildung 81: Überstände der zentrifugierten Verdünnungen 1:10 und 1:100 von P1 zeigen noch deutliche Trübungen (SCHLÖR, 2013) .....	96
Abbildung 82: Analysewerte der Hauptmessreihe für CSB und BSB <sub>5</sub> .....	102
Abbildung 83: Werte für die Verhältnisse von CSB zu BSB <sub>5</sub> der Hauptmessreihe .....	102
Abbildung 84: Analysewerte der Hauptmessreihe für den Zahn-Wellens-Test als Maß für die aerobe biologische Abbaubarkeit in biologischen Behandlungsanlagen .....	103
Abbildung 85: Analysewerte der Hauptmessreihe für den Phenol-Index.....	103
Abbildung 86: Analysewerte der Hauptmessreihe für den gesamt gebundenen Stickstoff TN <sub>b</sub> und für Phosphorverbindungen als Phosphor gesamt P <sub>gesamt</sub> .....	104
Abbildung 87: Analysewerte der Hauptmessreihe für Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Nitrat NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> und Chlorid Cl <sup>-</sup> ..	104
Abbildung 88: Analysewerte der Hauptmessreihe für Schwermetalle .....	105
Abbildung 89: Vergleich von gepresste (links) und ungepressten Hackgutpartikel (rechts) .....	106

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Varianten für den Einsatz eines mechanischen Trocknungssystems .....	10
Tabelle 2: Raumdichten unterschiedlicher Autoren (WITTKOPF, 2005, S. 23).....	14
Tabelle 3: Holzdichten in Abhängigkeit vom Wassergehalt (KALTSCHMITT, 2009, S. 353).....	14
Tabelle 4: Art der Wasserbindung im Holz (KALTSCHMITT, 2009, S. 315) .....	15
Tabelle 5: Beispiel nach WEINGARTMANN, 1991 zur Verdeutlichung .....	17
Tabelle 6: Darrdichte und Heizwert bei Bu/Fi (HANSEN, 2010, S. 13).....	21
Tabelle 7: Heizwert je kg bzw. Srm bei Bu/Fi (HANSEN, 2010, S. 13).....	21
Tabelle 8: Wassergehaltsklassen und ihre Beschreibung bei Hackgut (HANSEN, 2007, S. 9) .....	22
Tabelle 9: Kriterien für Brennstoffqualität .....	24
Tabelle 10: Jährlicher TM-Verlust/Jahr bei der Holzlagerung im Freien (HARTMANN, 2007, S. 38) ...	30
Tabelle 11: Eigenschaften der Satz Trocknungsverfahren.....	37
Tabelle 12: Eigenschaften des Schubwendetrockners .....	39
Tabelle 13: Eigenschaften der Bandtrocknung .....	41
Tabelle 14: Kostenkalkulation je Srm (Herstellerangaben Fa. Eberl Trocknungstechnik) .....	47
Tabelle 15: Effizienz technischer Trocknungsverfahren.....	52
Tabelle 16: Effizienz und Wirkungsgrad marktgängiger technischer Trocknungsverfahren .....	52
Tabelle 17: Effizienz von Hackschnitzeltrocknungsverfahren, (BRUMMACK 2008) .....	53
Tabelle 18: Zur Abwasserentsorgung relevante rechtliche Regelungen (ERBGUTH, SCHLACKE 2010, S. 256 – 278).....	54
Tabelle 19: Auszug aus Anhang 13 der AbwV zu Holzfaserplatten .....	55
Tabelle 20: Feuchte von unbehandelten und getrockneten Hackschnitzel (nach YOSHIDA et al., 2010) .....	58
Tabelle 21: Beschreibung der experimentellen Versuchsreihe.....	66
Tabelle 22: Beschreibung der untersuchten Varianten im Vorversuch (Teil 1) .....	67
Tabelle 23: Beschreibung der untersuchten Varianten im Vorversuch (Teil 2) .....	68
Tabelle 24: Beschreibung der untersuchten Varianten im Vorversuch (Teil 3) .....	69
Tabelle 25: Verwendeten Sortimente der Hauptmessreihe .....	70
Tabelle 26: Einstellung der Anlagenparameter .....	71
Tabelle 27: Messmethoden zur Bestimmung der Abwasserparameter im Vorversuch .....	74
Tabelle 28: Verwendete Analyse- und Messverfahren der Hauptmessreihe .....	76
Tabelle 29: Entwicklung der absoluten Wassergehaltswerte bei steigendem Pressdruck je nach Baumart .....	83
Tabelle 30: Entwicklung der relativen Wassergehaltswerte bei steigendem Pressdruck je nach Baumart .....	83
Tabelle 31: Entwicklung des Heizwertes in Joule/Gramm absolut im Vergleich zum Ausgangswert nach Baumart .....	89
Tabelle 32: Entwicklung des Heizwertes in Prozent relativ zum Ausgangswert nach Baumart .....	89
Tabelle 33: Wassergehaltsreduktion (absolut) im Verhältnis zu Energieaufnahme und Energiekosten .....	95

Tabelle 34: Messergebnisse des Vorversuchs .....	96
Tabelle 35: Chemische Analyse-Ergebnisse der Hauptmessreihe .....	99
Tabelle 36: Analyse-Ergebnisse des GC-MS-Screening auf mittel- bis schwerflüchtige, organische Substanzen .....	100
Tabelle 37: Kalkulatorische Grundlagen für Wirtschaftlichkeitsberechnung .....	108
Tabelle 38: Kalkulatorische Gegenüberstellung eines kalkulatorischen Beispiels eines konventionellen thermischen Trocknungssystems (Basiswerte für Wassergehaltsred. 60 bar Szenarios) im Vergleich zum innovativen mechanischen System mit den vergleichend dargestellten Druckniveaus von 60 und 70 bar bei den untersuchten Nadelbaumarten .....	109
Tabelle 39: Variantenvergleich zwischen kombinierten mechanischen/thermischen sowie rein konventionellem Trocknungsverfahren mit einer Zielgröße von 35% Wassergehalt.....	110
Tabelle 40: Variantenvergleich zwischen kombinierten mechanischen/thermischen sowie rein konventionellem Trocknungsverfahren mit einer Zielgröße von 30% Wassergehalt.....	111
Tabelle 41: Variantenvergleich zwischen kombinierten mechanischen/thermischen sowie rein konventionellem Trocknungsverfahren mit einer Zielgröße von 25% Wassergehalt.....	112
Tabelle 42: Stückkostenkalkulation von mechanischen sowie eines kalkulatorischen Beispiels für eine thermische Trocknung am Beispiel der Baumart Fichte (Parameter aus Druckniveau 60 bar).....	113
Tabelle 43: Schadstofffrachten für CSB, BSB <sub>5</sub> , Phenol-Index und AOX, bezogen 2 Srm Hackschnitzel während 2 Std.-Mischprobe in der Hauptmessreihe .....	115
Tabelle 44: Schadstofffrachten für CSB, BSB <sub>5</sub> , Phenol-Index und AOX, bezogen auf eine Tonne Hackschnitzel pro Holzart .....	115
Tabelle 45: Auswahl von Parametern und deren Richtwerte aus Anhang A.1 des Merkblatts DWA-M 115-2 vom Juli 2005 (Hrsg./Vertrieb: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA – Theodor-Heuss-Allee 17, 53773 Hennef).....	117

## Literaturverzeichnis

- Adachi, Koji; Inoue, Masafumi; Kanayama, Kojo; Rowel, Roger M.; Kawai, Shuichi (2004):** Water removal of wet veneer by roller pressing, In: Journal of wood Science 50 (2004) S. 479–483
- Anonymus:** Merkblatt 01/07. Richtiges Lagern von Holzhackschnitzeln für Heizwerke: Vermeidung von Bränden durch Selbstentzündung. Carmen e.V., Technologie und Förderzentrum, Bayern.
- AUSTRIAN ENERGY AGENCY (2009):** Empfohlene Umrechnungsfaktoren für Energieholzsortimente bei Holz- bzw. Energiebilanzberechnungen, Wien, im Januar 2009, S. 6, abgerufen am 10.12.13 auf: <http://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/energieholz/werkzeuge-und-hilfsmittel/umrechnungsfaktoren.html>
- Bohnert, Johannes (2013):** Auskunft über Preisentwicklung Hackschnitzelsortimente durch: Email Befragung am 10.12.13
- Bormann, Hinnerk; Sievers, Michael (2002):** Emissionsfreier Holzspänetrockner mit Rückgewinnung von Terpenen (Teilvorhaben 2). Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Bormann, Hinnerk; Sievers, Michael; Gruber, Timon (2006):** Verbesserung der Produkteigenschaft von Holzextrakten durch prozessintegrierte Fraktionierung. Abschlussbericht für die AiF-Vorhaben 13819 N. Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut.
- Brummack, Joachim (2008):** Fremdenergiefreie Hackschnitzeltrocknung. Vortrag; Technische Universität Dresden, 18. Juni 2008.
- Brummack, Joachim (2008):** Lagerung, Trocknung und Logistik von Energiehackschnitzeln. Vortrag; Technische Universität Dresden, 07. Februar 2008
- CARMEN e.V., (2013):** Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln - der Energieholz-Index, abgerufen am 10.12.13 auf: <http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel/jahresmittelwerte>
- Erbguth, Wilfried; Schlacke, Sabine (2010):** Umweltrecht. Nomos, Baden-Baden.
- Golser, Michael; Pichler, Wilfried; Hader, Florian (Wien 2005):** Forschungsbericht. Energieholztrocknung Endbericht (HFA-Nr.: F 1887/04). Im Auftrag von Forst, Platte, Papier; Wien
- Große, Werner (2008):** Lagerung, Trocknung und Logistik von Energiehackschnitzeln. Vortrag; Technische Universität Dresden; 7. Februar 2008
- Gujer, Willi (2007):** Siedlungswasserwirtschaft. 3., bearb. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg

- Hahn, Jürgen und Schardt, Markus (2007):** Der Energiegehalt von Holz und seine Bewertung; In: Merkblatt 12 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.); Freising, Lerchl-Druck.
- Hahn, Jürgen (2007):** Umrechnungszahlen und Verkaufsmaße von Scheitholz. Genaue Kenntnis über Energieinhalt wird wegen steigender Preise immer wichtiger. In: LWF aktuell 61 / 2007, S. 24-25. Lerchl Druck, Freising.
- Hansen, Hermann (2007):** Marktübersicht. Hackschnitzel-Heizungen In: Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.) Hürth, Media Cologne Kommunikationsmedien GmbH.
- Hansen, Hermann (2010):** Marktübersicht. Hackschnitzel-Heizungen (3., aktualisierte Auflage, Mai (2010); In: Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), Rostock: Stadtdruckerei Weidner
- FNR (2007):** Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen (4., unveränderte Auflage 2007) In: Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.); Hürth, Media Cologne Kommunikationsmedien GmbH
- Hartmann, Hans; Reisinger, Klaus; Turowski, Peter; Roßmann, Paul (2007):** Handbuch. Bioenergie Kleinanlagen (2. vollständig überarbeitete Auflage (2007) In: Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.); Rostock: Stadtdruckerei Weidner
- Haygreen J. G. (1981):** Potential for compression drying of green wood chip fuel, In: Forest Products Journal 31 (1981) S. 43-54
- Haygreen J. G. (1982):** Mechanics of compression drying solid wood cubes and chip mats, In: Forest Products Journal 32 (1982) S. 30-38
- Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann (2001):** Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren (2. Auflage 2009); Berlin Heidelberg; Springer Verlag
- Laurila, Jussi; Havimob, Mikko; Lauhanena, Risto (2014):** Compression drying of energy wood, In: Fuel Processing Technology 124 (2014) S. 286-289
- Liu, Z.; Haygreen J. G. (1985):** Drying rates of wood chips during compression drying, In: Wood and Fiber Science 17 (1985) S. 214-227
- Marutzky, Rainer und Klaus, Seeger (1999):** Energie aus Holz und anderer Biomasse. Grundlagen, Technik, Entsorgung, Recht (1., unveränderter Nachdruck 2002). Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co.
- Schardt, Markus (2006):** Das Problem mit der Holzfeuchte und dem Wassergehalt. Genaue Definitionen bringen Licht ins Dunkel der babylonischen Sprachverwirrung; In: LWF aktuell 54/2006 (Hrsg.)

- Schulz, Wolfgang et.al. (2007):** Leitfaden. Verwertung von Wärmeüberschüssen von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Bremer Energie Institut. Bericht 2007
- Stucki, Gerhard (2000):** Zur Aussagekraft des biologischen Abbautests nach Zahn-Wellens zum Schicksal von chemischen Abwässern in Industriekläranlagen. Erfahrungen aus der chemischen Industrie. In: gwf - Wasser/Abwasser 141(10) (2000), S. 662-669. Deutscher Industrie-Verlag, München. Wagenführ, André; Scholz, Frieder [Hrsg.] (2012): Taschenbuch der Holztechnik. 2. aktualisierte Auflage. Carl Hanser Verlag, München
- Trübswetter, Thomas (2006):** Holztrocknung. Verfahren zur Trocknung von Schnittholz – Planung von Trocknungsanlagen. Carl Hanser Verlag, München, Wien
- V. Webenau, Bernhard (1999):** LWF -zertifiziert- Informationen aus der Wissenschaft/ Mai 2000. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Mai 2000
- Wagner, Roland (2010):** Was gibt es zu beachten – Trocknung von Holzhackschnitzeln mit Abwärme von Biogasanlagen. Carmen e.V., Vortrag vom 06.10.2010
- Wittkopf, Stefan (2005):** Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Dissertation der technischen Universität München
- Wittkopf, Stefan (2009):** Hackschnitzel richtig lagern! LWF Merkblatt 11. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising 2009.
- Yoshida, Takahiro; Sasaki, Hiroyuki; Takano, Tsutomu; Sawabe, Osamu (2010):** Dewatering of high-moisture wood chips by roller compression method, In: Biomass and Bioenergy 34 (2010) 1053 -1058

## Literatur online und weitere

**Agro Energien (2011):** Von der Idee, zum Projekt.  
<http://www.agroenergien.de/index.php/kwk-trocknungsboden>

**AgroEnergien (2011):** <http://www.agroenergien.de/index.php/kwk-trocknungsboden>

**Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2011):** Anlagentechnik. <http://www.lwf.bayern.de/waldbewirtschaftung/holz-logistik/energieaus-holz/30971/index.php> (02.02.2011).

**Cona (2011):** <http://www.cona.at/index.php?id=1>

**Eberl Trocknungsanlagen GmbH (2011):** <http://www.eberl-trocknungsanlagen.de/Hackschnitzeltrockner.212.0.html>

**Focke, Jan (2011-13):** Fotodatenbank InnoDry-Projekt

**ggm Industries (2011):** <http://www.ggmindustries.de/content.php?id=23>

**InnoDry (2011-12):** Konsortium-Datenbank (Rechte vorbehalten)

**Lauber Trocknungstechnik (2011):** <http://www.lauber-holztrockner.de/>

**Lunzner Energieerzeugung (2011):**  
<http://www.holzenergiehof.com/lunzner/schubbodentrockner.jpg>

**Mühlböck Trocknungstechnik (2011):** <http://www.lauber-holztrockner.de/muehlboeck-hackgut--und-spaenetrockner.html>

**Neuero Farm- und Fördertechnik (2011):** <http://www.neuero-farm.de/produkte/erneuerbare-energien/hackschnitzeltrockner.html>

**Riela Schubwendetrockner (2011):**  
[http://www.riela.de/html/produkte/trocknung\\_schubwende.html](http://www.riela.de/html/produkte/trocknung_schubwende.html)

**Schlör, Nadja (2013).** Fotodatenbank InnoDry-Projekt

**Stela Trocknungstechnik (2011):** <http://www.stela-drying-technology.de/de/produkte/trommeltrockner>.