



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

# **Orientierende Studie zur standorts- und lagerungsabhängigen Trocknung von Energieholz**

## **Diplomarbeit**

Erstellt von:

Matthias Lercher

Betreuer:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer  
Dipl.-Ing. Gernot Erber

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

Wien, November 2015

## Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG .....	1
1.1. Problemstellung .....	1
1.2. Zielsetzung .....	2
2. GRUNDLAGEN DER WASSERAUFNAHME IN HOLZ UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE ENERGETISCHE NUTZUNG .....	3
2.1. Definitionen .....	3
2.2. Hygroskopie von Holz .....	4
2.3. Wassergehalt im Holz .....	5
2.4. Sorption von Holzarten .....	6
2.5. Einfluss von Wassergehalt und Dichte auf den Heizwert .....	8
3. GRUNDLAGEN DER ENERGIEHOLZTROCKNUNG .....	10
3.1. Freilufttrocknung allgemein .....	10
3.2. Trockenmassenverlust .....	10
3.3. Trocknungsverlauf und Abdeckung .....	11
3.4. Trocknungspotential der Luft .....	11
4. MATERIAL UND METHODEN .....	13
4.1. Modellhypothese .....	13
4.2. Standort .....	13
4.3. Lagerung und Lagerungsvarianten .....	14
4.4. Wetterdaten .....	15
4.5. Datenerhebung .....	15
4.6. Laboranalyse .....	16
4.7. Statistische Analyse .....	16
5. ERGEBNISSE .....	18
5.1. Deskriptive Statistik .....	18
5.2. Trockenmassenverluste .....	21
5.3. Trocknungsverlauf .....	26
5.4. Trocknungseffizienz .....	30
5.5. Modellierung .....	33
6. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN .....	38
6.1. Trockenmassenverluste .....	38
6.2. Trocknungsverlauf .....	39

6.3. Trocknungseffizienz.....	39
6.4. Lagerungsdauer.....	40
6.5. Modellierung .....	40
6.6. Methodische Herausforderungen .....	41
6.7. Gültigkeit.....	42
6.8. Zukünftige Anwendungen .....	42
7. ZUSAMMENFASSUNG .....	43
8. LITERATURVERZEICHNIS .....	44
9. ANHANG.....	47
9.1. Abbildungsverzeichnis .....	47
9.2. Tabellenverzeichnis .....	48
9.3. Formelverzeichnis.....	48

## **Abstract**

The aim of this study was to quantify the drying performance of energy wood depending on the location, the storage variation and the tree species. Further, a model for the drying should be developed. For this purpose, an experiment was conducted at three sites. At each site two storage variants with five tree species each was set up.

The experiment took place from February 2014 to December 2014. At the beginning and end the dry mass and the moisture content of the material were determined. Each month, the material was weight to determine the monthly changes in weight and thus moisture content.

The average moisture content at the start was 44%. During the first five months of storage, a moisture content reduction to an average of 22% was observed. In the other five months from July to December, a moisture content increase of 1% on average was observed. Rewetting happened on rainy days in late summer and on days with high relative humidity in autumn. Overall, the coniferous species, such as spruce and pine, showed the highest drying efficiency. Contrary, the deciduous species such as beech, oak and hornbeam, showed lower drying efficiency.

On average, no significant differences could be observed in the amount of dry matter between start and end of the experiment. Beech showed the lowest dry matter loss.

The drying model included the variables tree species, storage variate, storage period length and period averages of temperature, relative humidity and the sum of rainfall. Plausible models could be obtained for beech, spruce and hornbeam, while oak and pine models did not perform satisfactorily.

**Keywords:** Energieholztrocknung, Freilufttrocknung, Wassergehaltsänderung, Trocknungseffizienz, Lagerungsvarianten, Trockenmassenverlust

## KURZFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war es die Trocknung von Energieholz abhängig von Standort, Lagerungsvariante und Baumart zu quantifizieren und den Verlauf der Trocknung zu modellieren. Dazu wurde ein Versuch auf drei Standorten mit jeweils zwei Lagerungsvarianten und je Variante mit fünf Baumarten angelegt. Der Versuch wurde über zehn Monatsperioden von Februar 2014 bis Dezember 2014 geführt. Zu Beginn und Ende wurden die Trockenmassen und die Wassergehalte des Versuchs ermittelt. Am Ende jeder Monatsperiode wurde eine Wiegung zur Bestimmung der monatlichen Wassergehaltsänderung durchgeführt.

Der mittlere Startwassergehalt lag bei 44 %. In den ersten fünf Monaten, von Februar bis Juli, konnte im Mittel eine Wassergehaltsreduktion auf 22 % beobachtet werden. In den weiteren fünf Monaten Juli bis Dezember konnte eine Wassergehaltszunahme im Mittel von 1 % beobachtet werden. Der höchste Trocknungserfolg zeigte sich also in den ersten fünf Trocknungsperioden. Es konnte Wiederbefeuchtung der Stammstücke an niederschlagsreichen Tagen im Spätsommer und an Tagen mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit im Herbst beobachtet werden. Insgesamt zeigten die Nadelbaumarten Fichte und Kiefer die höchste Trocknungseffizienz, die Laubbaumarten Buche, Eiche und Hainbuche die geringste Trocknungseffizienz.

Im Mittel konnten keine signifikanten Unterschiede im Ausmaß der Trockenmassenverluste beobachtet werden. Buche zeigte den geringsten Trockenmassenverlust, gefolgt von Fichte, Eiche, Hainbuche und Kiefer.

In das Regressionsmodell für die Wassergehaltsabnahme gingen Baumart, Lagerungsvariante, Lagerungsdauer in Tagen und Periodenmittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit sowie die periodische Niederschlagsmenge ein. Plausible Modelle konnten für Buche, Fichte und Hainbuche erstellt werden. Bei Eiche und Kiefer bildeten die Modelle den Trocknungsverlauf nur ungenügend ab.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand aus der Überlegung anhand einer orientierten Studie neue Erkenntnisse und Lösungsansätze für die Trocknung von Energieholz im Freien zu finden.

Hiermit möchte ich mich besonders bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer und Dipl.-Ing. Gernot Erber für die unermüdliche Hilfe und das zeitliche Engagement bei der Erarbeitung dieser Diplomarbeit bedanken. Ein weiterer Dank gilt Frau Huberta Kroisleitner, die mich tatkräftig bei den Außenaufnahmen und den Laborauswertungen unterstützt hat.

Besonderer Dank gilt meiner gesamten Familie für das zur Seite stehen im gesamten Studienverlauf. Ein ganz besonders Dank gilt in diesem Zusammenhang meinen Eltern, die mir letztlich dieses Studium ermöglicht haben.

# 1. EINLEITUNG

## 1.1. Problemstellung

Bis Ende des 19. Jahrhunderts war Biomasse mit Abstand die wichtigste Energieform für Industrie und private Haushalte. Die Verknappung der Holzvorräte und die alternativ günstigen fossilen Energiequellen führten zu einer industriellen und privaten Energiewende (HAHN, 2011). Durch kontinuierlich steigende Preise fossiler Energie (DIECKHÖNER et al., 2014) und zunehmendes Umweltbewusstsein der Bevölkerung konnte in den letzten Jahrzehnten ein zunehmender Trend zu erneuerbaren Energiequellen beobachtet werden, so auch bei Energieholz (SCHMIDT et al., 2014). Folglich haben Groß- und Kleinheizanlagen für Gewerbebetriebe und private Haushalte immer mehr an Bedeutung gewonnen.

Die steigende Nachfrage nach Energieholz für Großheizanlagen (Fernheizwerke) hat zur vermehrten Nutzung von Schlagabraum geführt, um den erhöhten Bedarf zu decken (KÖLLING et al., 2007). Aufgrund des hohen Wassergehalts von frischem Waldhackgut von bis zu 65% (KALTSCHMITT et al., 2001) wird frisches Waldhackgut hauptsächlich in Großheizanlagen verfeuert und ist für Kleinheizanlagen nicht geeignet (PAPST, 2015).

Zwischen den Jahren 2003 und 2009 konnte ein Anstieg der Energieholznutzung privater Haushalte von 18,7% auf 20% beobachtet werden (ÖBMV, 2015). Für die sinnvolle energetische Nutzung von Energieholz in Kleinheizanlagen ist eine Reduzierung des Wassergehalts notwendig, um den Heizwert (Hu) zu steigern (HADER, 2005), die Lagerfähigkeit zu erhöhen und den Substanzabbau (Trockenmassenverlust) zu verringern (HARTMANN, 2003). Der Heizwert ist die maximal nutzbare Wärmemenge bei Verbrennung eines Brennstoffs, ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme des im Abgas befindlichen Wasserdampfes (ÖNORM M 7132). Bei Energieholz ist er von der jeweiligen Baumart abhängig, wobei als Faustregel angenommen werden kann, dass Nadelhölzer einen um 5% höheren Heizwert aufweisen als Laubhölzer (JUNG, 2015). Bei einem Wassergehalt von unter 15% kann Biomasse über einen längeren Zeitraum gelagert werden und Trockenmassenverluste durch biologische Aktivitäten unterbunden werden. Bei Energieholzlagerung im Freiland können die Trockenmassenverluste bei Fichte und Kiefer 1-3 % pro Jahr betragen (HARTMANN, 2003). Durch geringeren Wassergehalt können auch die Transportkosten von Energieholz verringert werden (ERBER et al., 2015). Entscheidend für den Trocknungsverlauf und die Trocknungsdauer ist die Trocknungstechnik, wobei zwischen Freilufttrocknung und technischen Trocknungsverfahren unterschieden wird. Abhängig vom Standort und der Witterung werden für Laubholzarten wie Buche und Eiche zwei Jahre und für Nadelholzarten wie Fichte und Kiefer mindestens ein Jahr Trocknungsdauer empfohlen (BUX, 2006).

## **1.2. Zielsetzung**

In der vorliegenden Arbeit wird im Rahmen eines Pilotversuches im kleinen Maßstab die Lagerung von Energieholz fünf verschiedener Baumarten auf drei Standorten mit jeweils zwei Lagerungsvarianten untersucht. Dabei soll festgestellt werden, ob Unterschiede zwischen den Baumarten, Standorten und den Lagerungsvarianten beobachtet werden können.

Die Forschungsfragen lauten wie folgt:

1. Wie unterscheiden sich die Trockenmassenverluste von ein Meter langen Stammstücken, abhängig von Baumart, Lagerungsort und Lagerungsart?
2. Wie unterscheiden sich Trocknungsverlauf und -effizienz von ein Meter langen Stammstücken, abhängig von Baumart, Lagerungsort und Lagerungsart?
3. Ist es möglich den Trocknungsverlauf abhängig von Lagerungsort, Lagerungsart und Wetter zu modellieren?

## 2. GRUNDLAGEN DER WASSERAUFNAHME IN HOLZ UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE ENERGETISCHE NUTZUNG

### 2.1. Definitionen

#### – Wassergehalt und Holzfeuchte

Der Wassergehalt darf mit der Holzfeuchte nicht verwechselt werden. Die Holzfeuchte (Formel 1) bezieht sich auf das Darrgewicht, während der Wassergehalt (Formel 2) auf dem Verhältnis von Wasseranteil und Nassgewicht des Holzes beruht (SCHARDT, 2006).

$$\text{Holzfeuchte in \%} = \frac{\text{im Holz enthaltene Wassermasse}}{\text{Trockenmasse des Holzes}} \times 100$$

Formel 1: Holzfeuchte (SCHARDT, 2006).

$$\text{Wassergehalt in \%} = \frac{\text{im Holz enthaltene Wassermasse}}{\text{Gesamtmasse des (feuchten)Holzes}} \times 100$$

Formel 2: Wassergehalt (SCHARDT, 2006).

#### – Relative und absolute Luftfeuchtigkeit

Unter Luftfeuchtigkeit versteht man gasförmiges, mit Luft vermisches Wasser. Es wird zwischen absoluter Luftfeuchtigkeit und relativer Luftfeuchtigkeit unterschieden. Die absolute Luftfeuchtigkeit wird in g/m<sup>3</sup> angegeben und ist der maximale Wasserdampfgehalt bei vorherrschender Temperatur. Die relative Luftfeuchtigkeit gibt das Verhältnis zwischen aktueller und absoluter Luftfeuchtigkeit in Prozent an (PASCHOTTA, 2015).

#### – Brennwert und Heizwert

Der Brennwert entspricht der Energie, die bei einer vollständigen Verbrennung des Brennstoffes freigegeben wird. Der Brennwert beinhaltet den Heizwert plus die durch Kondensation des entstehenden Wasserdampfes freiwerdende Energie (Kondensationswärme). Der Heizwert ist hingegen die maximale nutzbare Wärmemenge bei der Verbrennung eines Brennstoffes (JUNG, 2015).

## – Dichte

Die Dichte von Holz ist eine die Holzeigenschaften beeinflussende Kenngröße und variiert zwischen den Holzarten. Es werden folgende Dichten unterschieden:

- Darrdichte (Masse darrtrocken zu Volumen darrtrocken).
- Rohdichte (Dichte bei Normalklima von 20 °C und 65% relativer Luftfeuchte).
- Reindichte (Masse des darrgetrockneten Holzes zu Volumen der reinen Zellwand, ohne Hohlräume) (WAGENFÜHR et al., 2008).

## 2.2. Hygroskopie von Holz

Holz ist bei der Lagerung im Freien dem Einfluss des Klimas ausgesetzt. Entscheidende Einflussfaktoren sind: Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Niederschlag. Holz ist ein hygroskopischer Stoff und besitzt die Eigenschaft Wasserdampf aus seiner Umgebung aufzunehmen (Adsorption) und umgekehrt jene an diese abzugeben (Desorption) (EICHLER, 1979). Dabei ist ein Hysterese-Effekt zu beobachten (Abbildung 1). Die Holzfeuchte bei Desorption ist um 1 bis 2 % höher als bei Adsorption (WAGENFÜHR et al., 2008). Diese Erscheinung ist gesetzmäßig und in ihrer Größenordnung von der Temperatur und der Wasserdampfkonzentration im Holz und außerhalb vom Holz abhängig. Bleiben Temperatur und Wasserdampfkonzentration der das Holz umgebenden Luft längere Zeit konstant stellt sich ein hygroskopisches Gleichgewicht ein (EICHLER, 1979). Drei Grenzzustände des Systems Holz – Wasser können unterschieden werden:

- **Darrtrocken** (kein Wasser vorhanden, Holzfeuchte 0%).
- **Fasersättigung** (das gesamte Mikrosystem der Zellwand ist maximal mit Wasser gefüllt).
- **Wassersättigung** (das Mikro- und Makrosystem ist maximal mit Wasser gefüllt) (WAGENFÜHR et al., 2008).

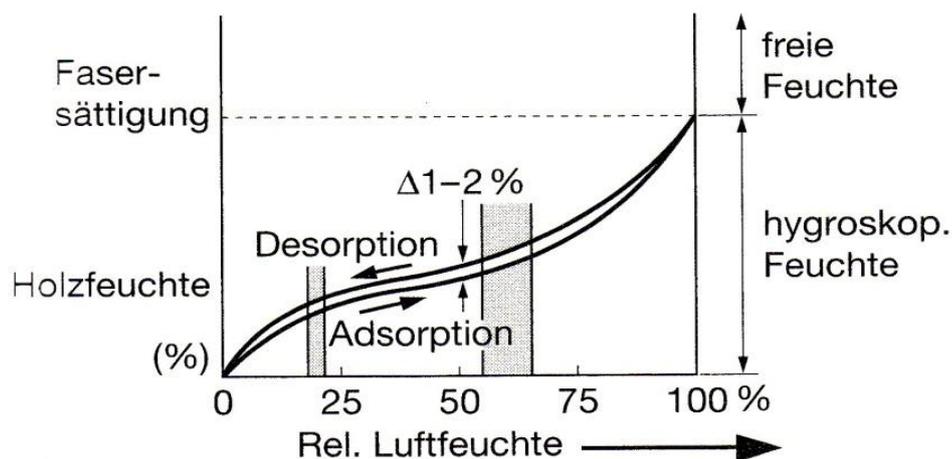


Abbildung 1: Hygroskopische Eigenschaften von Holz in Abhängigkeit von relativer Luftfeuchte (WAGENFÜHR et al., 2008).

### 2.3. Wassergehalt im Holz

In Abhängigkeit von Biomasseart, Jahreszeit und dem Zeitraum zwischen der Bereitstellung und der energetischen Nutzung ist der Wassergehalt von Holz erheblichen Schwankungen unterworfen. Die Bandbreite reicht üblicherweise von ca. 8 bis 65%. Waldfrisches Holz liegt je nach Baumart, Alter und Jahreszeit zwischen 45 und 60%, wobei Harthölzer geringere und Weichholzer höhere Werte aufweisen (KALTSCHMITT et al., 2009). Bei Laub- und Nadelhölzern ist zwischen Splint und Kernholz zu unterscheiden. Splintholz dient im lebenden Baum der Wasserleitung und unterscheidet sich daher vom Kernholz in der Färbung und im Wassergehalt (Tabelle 1) (WAGENFÜHR et al., 2008). Das im Holz enthaltene Wasser kann zwei Aggregatzustände aufweisen (EICHLER, 1979). Entweder gebundenes Wasser (chemisch, physikalisch, kapillar) in den Mikroporen (Poren im Zellwandsystem) und als freies Wasser (oberhalb des Fasersättigungsbereichs) in den Makroporen (WAGENFÜHR et al., 2008). In den Makroporen wird das freie Wasser nur mit geringen Bindekräften gehalten, hingegen bei den Mikroporen mit hohen Bindekräften (Abbildung 2). Um gebundenes Wasser zu verdunsten sind größere Energiemengen zuzuführen bzw. die Lagerdauer zu erhöhen (EICHLER, 1979).

Tabelle 1: Wassergehalt in % im Splint- und Kernholz (verändert nach MAYER-WEGELIN, 1955).

Baumart	Splint	Kern
Kiefer	54-60	25-33
Fichte	56-62	25-33
Buche	41-50	33-44
Eiche	41-50	38-47

Bindung	Wasser- gehalt [%]	Merkmale	Trocknungs- geschwindigkeit	Bindungs- intensität
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 gebunden, Trocknung durch Diffusion und Kapillarkräfte		
Elektrosorption	5,7-13	Wasser an der Micelle durch elektrische Kräfte gebunden		
Chemosorption	0-5,7	Molekulare Anziehungskräfte		

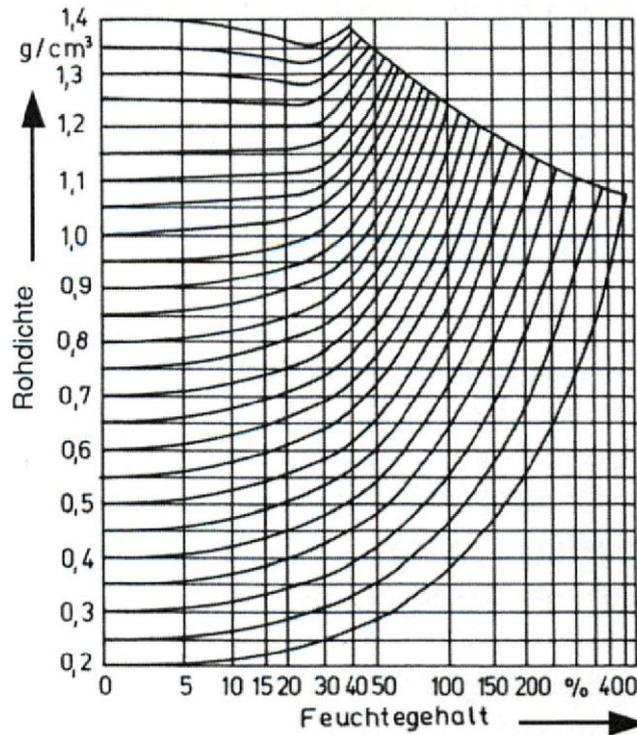
Abbildung 2: Bindungsintensitäten vom Wasser im Holzkörper (verändert nach KALTSCHMITT, 2009).

## 2.4. Sorption von Holzarten

Bei der Lagerung von Holz im Freien wird der Feuchtegleichgewichtszustand unter den gleichen vorherrschenden klimatischen Bedingungen abhängig von der Baumart schneller bzw. langsamer erreichen. Wesentliche Kriterien dafür sind die Rohdichte, Holzdicke (Querschnittsfläche) und der Anteil an entrindeten und berindeten Holzflächen. Entscheidend für eine schnelle Freilufttrocknung sind eine hohe Lufttemperatur, hohe Luftgeschwindigkeit und eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit (EICHLER, 1979). Bei einer relativen Luftfeuchte von 100% ist das Sorptionsverhalten von Holz unterbunden. Dabei ist der sogenannte Fasersättigungsbereich erreicht. Dieser liegt für die meisten Holzarten zwischen 28 und 32% Holzfeuchte. Einer bestimmten Temperatur und relativen Luftfeuchte ist also eine holzartenspezifische Holzfeuchte zuzuordnen (WAGENFÜHR et al., 2008). Unabhängig von der Holzart trocknet Holz mit einer höheren Rohdichte langsamer und benötigen aufgrund dessen längere Trocknungszeiten (Tabelle 2) (EICHLER, 1979). Die Rohdichte ist eine der wichtigsten Eigenschaften von Holz. Infolge des hygroscopischen Verhaltens von Holz ist die Dichte feuchtigkeitsabhängig (Abbildung 3). Je höher die Rohdichte ist, umso höher ist der Zellwandanteil, und der Porenanteil dementsprechend kleiner.

**Tabelle 2: Darrdichten von Weichhölzern und Harthölzern (verändert nach HARTMANN, 2007).**

<b>Weichhölzer</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Harthölzer</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>
Fichte	0,43	Eiche	0,66
Kiefer	0,49	Buche	0,65
		Hainbuche	0,75



**Abbildung 3: Einfluss der Holzfeuchte auf die Rohdichte (DIN 52182)**

## 2.5. Einfluss von Wassergehalt und Dichte auf den Heizwert

Der Wassergehalt ist die bestimmende Einflussgröße auf den Heizwert von Energieholz. Da wasserfreie Biomasse in der Natur praktisch nicht vorkommt, müssen stets mehr oder weniger große Mengen Feuchtigkeit während der Verbrennung verdunsten. Die Verdunstung des Wassers während der Verbrennung vermindert somit die Nettoenergieausbeute. Zur Verdunstung des Wassers wird eine Wärmemenge von 2,44 MJ/kg (0,678 kWh/kg) Wasser benötigt (HARTMANN, 2007). Daher sinkt der Heizwert von Biomasse mit zunehmendem Wassergehalt. Der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Heizwert ist in Formel 3 dargestellt.

$$H_{u(w)} = \frac{H_{u(wf)} \times (100 - w) - 2,44 w}{100}$$

$H_{u(w)}$ ..... Heizwert bei Wassergehalt (MJ/kg)

$H_{u(wf)}$ ..... Heizwert der Holztrockenmasse

2,44..... Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg bei 25 °C

Formel 3: Heizwertberechnung für Holz (HARTMANN, 2007).

Abbildung 4 zeigt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Heizwert besteht. Der Heizwert von Holz (ca. 18,5 MJ/kg) nimmt mit zunehmendem Wassergehalt bzw. ansteigender Brennstoff-Feuchte ab. Bei einem Wassergehalt von 88 % bzw. 73 % Brennstoff-Feuchte ist der Heizwert gleich null.

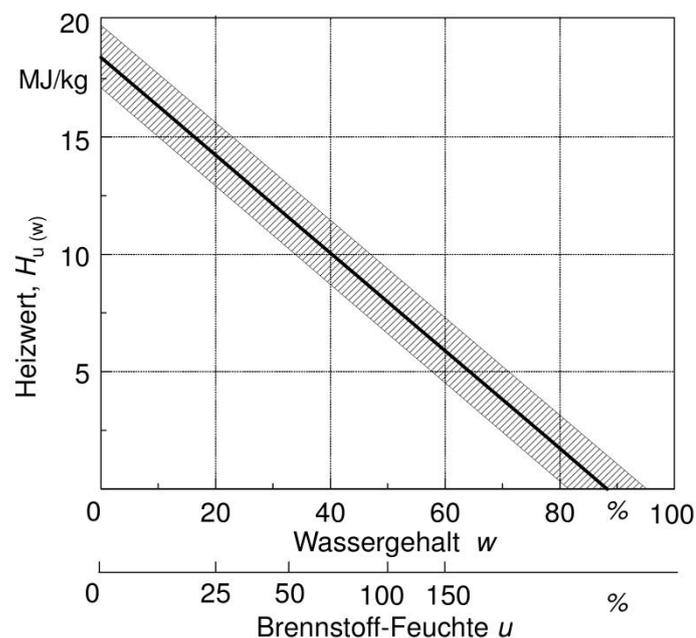


Abbildung 4: Heizwert von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Holzfeuchte (HARTMANN, 2007).

Auf den Heizwert hat darüber hinaus auch die Holzart einen Einfluss. Grundsätzlich kann zwischen Weich- und Harthölzern unterschieden werden. Bei den Weichhölzern handelt es sich um Nadelhölzer wie Fichte und Kiefer und bei den Harthölzern um Laubhölzer wie Buche, Hainbuche und Eiche. Der Heizwert von Nadelholz ist um ca. 5% höher als jener von Laubhölzern. Nadelhölzer brennen schneller ab und erzeugen dabei höhere Temperaturen. Begründet wird das schnellere Abbrennen der Nadelhölzer mit deren Holzzusammensetzung. In Tabelle 3 sind die Bestandteile von Holz angeführt - deren Heizwert variiert zwischen 16,5 und 38 MJ/kg. Zu 95 % besteht Holz aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin, wobei der Ligninanteil bei Laubhölzern um 5 % geringer sein kann. Die restlichen 5 % bilden die Wachse, Fette, Proteine etc., deren Gehalte den Heizwert stark beeinflussen (HARTMANN, 2007).

**Tabelle 3: Heizwerte der Holzinhaltsstoffe (HARTMANN, 2007).**

<b>Bestandteil</b>	<b>Anteil [%]</b>	<b>Heizwert [MJ/kg/TS]</b>	<b>Gesamt [%]</b>
Cellulose	50	17,5	
Hemicellulose	20-25	16,5-17	95
Lignin	20-25	25-30	
Harze, Wachse, ect.	5	38	5

### 3. GRUNDLAGEN DER ENERGIEHOLZTROCKNUNG

#### 3.1. Freilufttrocknung allgemein

Die natürliche Freilufttrocknung basiert auf dem Prinzip, dass die an der bestrahlten Erdoberfläche erwärmte Luft durch eine, infolge leichter Luftdruckunterschiede ausgelöste, Windströmung an den Polter gelangt. Eine direkte Energieübertragung durch die Sonneneinstrahlung ist nur im Randbereich des Polters möglich (WAGENFÜHR et al., 2008). Nach KRÖLL (1978) sind bei Windgeschwindigkeiten vom  $3 \text{ m s}^{-1}$  und je nach Witterungsbedingungen Energiestromdichten von 15 bis  $280 \text{ W m}^{-2}$  möglich. Aufgrund der geringen treibenden Kräfte im hygrokopischen Feuchtebereich sind bei der Freilufttrocknung nur geringe Trocknungsgeschwindigkeiten möglich. Abhängig von den klimatischen Verhältnissen kann bei der Freilufttrocknung der Wassergehalte maximal auf 12 bis 15 % gesenkt werden. Die Freilufttrocknung ist durch folgende Maßnahmen positiv beeinflussbar: Optimale Ausrichtung des Holzpolters auf die Hauptwindrichtung und Schutz des Polters vor Regen durch Abdeckung.

#### 3.2. Trockenmassenverlust

Holz wird durch biotische und abiotische Faktoren beansprucht. Unter einem biotischen Befall versteht man Holz verfärbende oder Holz abbauende Mikroorganismen sowie Insekten. Abiotische Belastung erfolgt durch Feuchte- und Temperaturwechsel, durch Lichtbeanspruchung und durch mechanische oder chemische Einwirkung (ROTHKAMM et al., 2002). Hölzer besitzen natürliche Widerstandskräfte gegen biotische und abiotische Beanspruchungen. Der Abbau wird dabei von Kerninhaltsstoffen und dem anatomischen Aufbau beeinflusst. Diese Resistenzen variieren sehr stark innerhalb des Holzkörpers und zwischen den Holzarten. Der Splint ist aufgrund des hohen Wassergehaltes und der Inhaltsstoffe wenig resistent gegen abbauende Prozesse. Holzzerstörende Pilze benötigen eine Holzfeuchte oberhalb des Fasersättigungspunktes um zu wachsen und Trockenmassenverluste zu bewirken (WAGENFÜHR et al., 2008). Untersuchungen von NEUSSER et al. (1977b), MACKENSEN & BAUHUS (1999) haben gezeigt, dass der biologische Abbau bei der Rundholzlagerung im ersten Jahr gering ist und erst in den darauffolgenden Jahren zunimmt.

**Tabelle 4: Trockenmassenverlust von Stangenholz bei der Lagerung im Freien in Prozent (verändert nach HARTMANN et al., 2001)**

Lagerungsdauer	1 Jahr	2 Jahr	3 Jahr
Fichte	0,6-1,3 %	1,2-2,8 %	1,9-2,4 %
Kiefer	0,8-2,6 %	2,4-5,9 %	4,0-9,2 %

### 3.3. Trocknungsverlauf und Abdeckung

Unmittelbar zu Lagerbeginn setzt bei frisch geschlagenem Holz die Trocknung ein. Schon in den Wintermonaten beginnt das Holz aufgrund geringer Luftfeuchten zu trocknen. Ab Anfang März steigen die maximalen monatlichen Trocknungsraten an. Nach warmen Frühjahrsmonaten kann im Winter geschlägertes Holz bei günstigen Lagerbedingungen schon im Juli verfeuert werden. Vergleiche mit feuchten Frühjahrsmonaten haben nur geringe Unterschiede im Trocknungsverlauf gezeigt. Ab September nimmt das Holz wieder Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. In unbedeckten Zustand tragen auch die Niederschläge zur Feuchtigkeitszunahme bei. Zwischen Oktober und Dezember ist eine Wiederbefeuchtung zu beobachten. Abgedecktes Holz trocknet in den Wintermonaten zunächst rascher, diesen Vorsprung kann das nicht abgedeckte Holz jedoch in den Sommermonaten wieder wettmachen. Eine Abdeckung ist aber als Niederschlagsschutz sinnvoll, insbesondere an niederschlagsreichen Standorten. Ab September kann dadurch auch die über das Winterhalbjahr beobachtete Wiederbefeuchtung reduziert werden. Bei der Abdeckung sollte darauf geachtet werden, dass ein genügend starker Luftstrom durch den Polter gewährleistet ist (HARTMANN, 2007).

### 3.4. Trocknungspotential der Luft

Bei der Freilufttrocknung sind die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit die entscheidenden Einflussgrößen. Die Luftfeuchtigkeit hängt von der Lufttemperatur ab und wird je nach Sättigungsgrad in relativer Luftfeuchte ausgedrückt. Je höher die Temperatur, umso mehr kann die Luft Wasserdampf aufnehmen. So kann 1 m<sup>3</sup> Luft bei 20°C ca. 17,3 g Wasser enthalten. Sinkt die Temperatur ab, wird bei gleichbleibendem absolutem Wassergehalt ihr Sättigungsgrad größer, die relative Luftfeuchtigkeit steigt dabei bis zu 100% (Nebel und Taubildung). Bei 0°C kann Luft nur noch ca. 4,8g Wasser enthalten. Die Wasseraufnahmefähigkeit von Luft ist der Schlüssel zur Freilufttrocknung. Die zu erwartende Trocknung des Energieholzes ist umso intensiver, je wärmer und trockener die Umgebungsluft ist. Die trockene Umgebungsluft ist bestrebt die Feuchtigkeit des Holzes aufzunehmen bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt (Hygroskopie von Holz). Abbildung 5 zeigt das H,x-Diagramm nach Mollier mit dem es möglich ist, den Wassergehalt [g kg<sup>-1</sup>] (Trocknungserfolg) mit vorhandener Lufttemperatur [°C] und relativen Feuchtigkeit [g m<sup>-3</sup>] zu ermitteln.

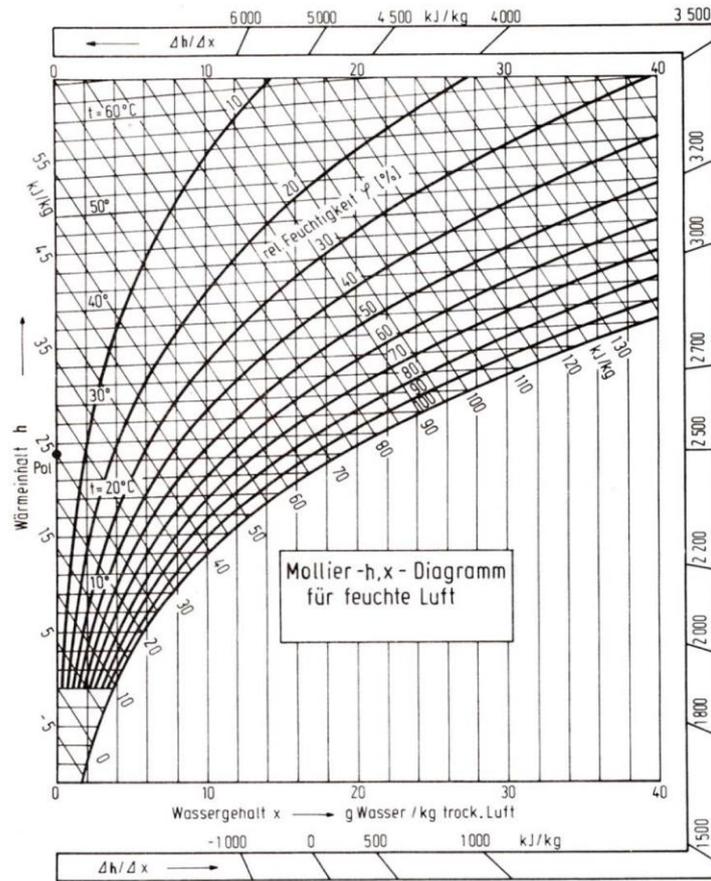


Abbildung 5: h-x-Diagramm nach Mollier zur Bestimmung von Temperatur, relativer Feuchtigkeit und Wassergehalt (BRUSCHE, 1983).

## 4. MATERIAL UND METHODEN

### 4.1. Modellhypothese

Hypothese 1: Das Ausmaß der Trockenmassenverluste unterscheidet sich abhängig von Baumart, Lagerungsort und Lagerungsart.

Hypothese 2: Trocknungsverlauf und -effizienz unterscheiden sich abhängig von Baumart, Lagerungsort und Lagerungsart.

Hypothese 3: Der Trocknungsverlauf kann abhängig vom Lagerungsort, Lagerungsart und Wetter modelliert werden.

### 4.2. Standort

Für den Versuch wurden von der Firma „Johann Schwarz GmbH“ (Pilgersdorf/Mittelburgenland) Flächen und Material zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurde für die Versuchsreihe ein Standort direkt neben einer bestehenden Wetterstation und zwei weitere jeweils im Umkreis von 950 m ausgewählt. Ein Freilandstandort (Breite: 47°26'45.80"N, Länge: 16°20'21.44"E), ein Waldrandstandort (Breite: 47°27'13.15"N, Länge: 16°20'38.32"E) und ein Waldstandort (Breite: 47°27'14.17"N, Länge: 16°20'39.44"E). Direkt neben einer bestehenden Wetterstation wurde der Freilandversuch angelegt. Der Waldrandversuch und der Waldversuch wurden in einem Umkreis von 950 m um die Wetterstation angelegt.

Pilgersdorf liegt auf einer Seehöhe von 375 m im Wuchsgebiet 5.3 Ost- und Mittelsteirisches Bergland. Das Klima ist von Nordosten nach Südwesten zunehmend von subillyrischem Einfluss geprägt und dadurch auch von hoher Luftfeuchtigkeit, hoher Gewittergefahr und folglich mit höheren Niederschlägen gekennzeichnet. Der Jahresniederschlag liegt im Bereich von 700 bis 900 mm, wobei im montanen bis subalpinem Bereich Spitzen bis zu 1100 mm keine Seltenheit sind. Das Niederschlagsmaximum liegt im Sommer, im Winter fallen die Niederschläge nur gering aus (BFW, 2015). Tabelle 5 zeigt die langjährigen Mittel der Wetterstation Bernstein (1961-1990) und des Versuchsjahres im Vergleich.

**Tabelle 5: Mittlere Temperatur und mittlerer Niederschlag im Jahresvergleich (Quelle: Wetterstation Bernstein, ZAMG).**

Monat	Lufttemperatur [°C]		Niederschlag [mm]	
	1961-1990	2014	1961-1990	2014
Jänner	-2,3	-	30	-
Februar	-0,3	3,2	33	47
März	3,5	6,6	41	17
April	8,3	9,9	53	44
Mai	12,9	12,6	89	146
Juni	16,0	16,6	107	48
Juli	18,0	18,9	103	170
August	17,6	16,9	96	82
September	14,5	13,8	60	88
Oktober	9,3	10,6	49	38
November	3,4	6,7	56	40
Dezember	-0,6	1,7	32	28
<b>Jahresmittel</b>	<b>8,35</b>	<b>10,68</b>	<b>749</b>	<b>748</b>

### 4.3. Lagerung und Lagerungsvarianten

Der Freilandversuch wurde auf einem nach Osten geneigten Feldstück positioniert, wobei nördlich freie Flur, östlich eine Straße mit Grabenauslauf, südlich ein Windschutzgürtel mit Hecken und Sträuchern und westlich ein Waldstück angrenzen. Der Waldrandversuch und der Waldversuch wurden in nordöstlicher Richtung, zirka 950 m entfernt, nahe der örtlichen Biogasanlage angelegt. Der Waldrandversuch lag dabei südlich eines Fichten- und östlich eines Eschenwaldstücks. Der Waldversuch befand sich im genannten Eschenwaldstück. Alle drei Versuche wurden mit den Lagerungsvarianten „offen“ und „geschlossen“ belegt. Hierfür wurden Holzrahmen gefertigt, die in Längsrichtung der Bloche offen, quer zu den Blochen geschlossen und nach oben offen waren. Bei der Lagerungsvariante „geschlossen“ wurde diese nach oben durch eine hölzerne Abdeckung geschlossen. Die Bloche waren zirka 20 cm vom Boden entfernt und wurden von Bewuchs freigehalten.

**Abbildung 6: Freilandstandort mit Lagerungsvariante offen und geschlossen.**

#### 4.4. Wetterdaten

Die Wetterdaten für die statistische Analyse wurden von einer nahen Wetterstation bezogen. Diese lieferte folgende Daten: Luftfeuchtigkeit [%], Lufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ; K], Windgeschwindigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ], Windrichtung [ $^{\circ}$ ], Solarstrahlung [ $\text{W m}^{-2}$ ] und Niederschlag [mm]. Diese Daten wurden einmal täglich von einem Server der Universität für Bodenkultur Wien abgerufen und gespeichert.

#### 4.5. Datenerhebung

Der Versuch wurde am 10.02.2014 angelegt und die Datenerhebung bis 12.12.2014 durchgeführt (Tabelle 6). Das von der Firma Johann Schwarz GmbH zur Verfügung gestellte Holz, 15 Stämme mit einer mittleren Länge von 4,10 m und einem mittleren Durchmesser von 14,7 cm, setzte sich aus den fünf Baumarten Fichte, Kiefer, Buche, Hainbuche und Eiche zusammen. Von diesen Stämmen entfielen je drei Stämme auf eine Baumart. Ein Meter lange Stücke wurden abgelängt und mit einer Nummer versehen. Zwischen den Meterstücken wurden 2,5 cm starke Stammscheiben entnommen (Abbildung 7). Anschließend wurden diese gewogen, verpackt und für die weitere Laboranalyse zwischengelagert. Die Meterstücke wurden zufällig auf die Versuchsvarianten aufgeteilt. Nach Aufteilung der Stammstücke auf die Varianten wurde die erste Wiegung durchgeführt. Die Wiegung der Stammstücke erfolgte manuell mithilfe einer Hängewaage.



**Abbildung 7: Stammscheibenentnahme für die Laboranalyse.**

Die Datenerhebung gliedert sich in die Bereiche Aufzeichnungen an der Wetterstation und Wiegung der Bloche. Es wurden 304 Tage lang Wetterdaten aufgezeichnet. Bei den Blochen wurde darauf geachtet in etwa monatlichen Intervallen Wiegungen durchzuführen. Insgesamt wurden 11 Wiegungen

durchgeführt. Der Versuch wurde am 12.12.2014 abgebaut und die Meterstücke ein letztes Mal gewogen. Nach der Wiegung wurden im Abstand von 15 cm von den Schnittflächen zwei Stammscheiben mit einer Stärke von 2,5 cm entnommen. Die Stammscheiben wurden den Meterstücken zugeordnet, gewogen verpackt und für die weitere Laboranalyse zwischengelagert.

**Tabelle 6: Aufnahmeperioden von Februar bis Dezember**

Periode	Monat	Periodenanfang	Periodenende
1	Februar	2014-02-10	2014-03-03
2	März	2014-03-04	2014-04-08
3	April	2014-04-09	2014-05-06
4	Mai	2014-05-07	2014-06-01
5	Juni	2014-06-02	2014-07-06
6	Juli	2014-07-07	2014-08-12
7	August	2014-08-13	2014-08-30
8	September	2014-09-01	2014-10-07
9	Oktober	2014-10-08	2014-11-24
10	November	2014-11-25	2014-12-11

#### 4.6. Laboranalyse

Die Laboranalyse wurde zu Beginn und am Ende der Aufnahmen nach der ÖNORM CEN/TS 14774-2 (2004) durchgeführt. Die Proben wurden im Darrschrank bei 103°C +/- 2°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, gewogen und das Volumen bestimmt. Somit konnte die Darrdichte nach Formel 5 berechnet werden.

$$p = \frac{m}{v}$$

$p$ .....Darrdichte g cm<sup>-3</sup>

$m$ .....Masse g

$v$ .....Volumen cm<sup>3</sup>

**Formel 4: Darrdichte**

#### 4.7. Statistische Analyse

Für die statistische Analyse wurden die gesammelten Daten im Microsoft EXCEL aufbereitet. Die gewonnenen Daten wurden nach Aufnahmeperioden geordnet und Monats- und Periodenmittelwerte gebildet. Mit den Monatsmittelwerten der Wetterstation wurden im Microsoft EXCEL Säulendiagramme erstellt. Die Periodenmittelwerte der Trockenmassenverluste und Wassergehaltsänderungen wurden in Säulen- und Liniendiagramme dargestellt und jedes Auswerteschema dabei statistisch auf Zusammenhänge geprüft. Dafür wurde die Datenanalyse in Microsoft EXCEL herangezogen. Geprüft wurde mittels Varianzanalyse und paarweisem T-Test. Für die Modellierung wurden die Wetterdaten und die

Wiegedaten geordnet nach Perioden, Lagerungsort, Lagerungsart und Baumarten im Microsoft EXCEL für die weitere Verarbeitung im Statistikprogramm R aufbereitet. Mit dem Statistikprogramm wurde für jede Baumarten und Lagerungsvariante einen Wassergehaltsabnahmefunktion erstellt. Dabei stellt die abhängige Variable die Wassergehaltsänderung pro Periode dar. Als unabhängige Variable kamen Wetterparameter, Lagerungsort und –variante in Frage.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1. Deskriptive Statistik

Die Lufttemperatur zeigt einen typischen Jahresverlauf (Abbildung 8). Im Monat Dezember wurde die niedrigste Tagesmitteltemperatur mit 1,75 °C, im Monat Juli die höchste Tagesmitteltemperatur mit 18,90 °C gemessen. Die niedrigste Tagesmitteltemperatur wurde am 10.12.2014 (-1,34 °C), die höchste Tagesmitteltemperatur am 20.07.2014 (23,85 °C) gemessen. Die mittlere Tagestemperatur über den Versuchszeitraum lag bei 10,70 °C.

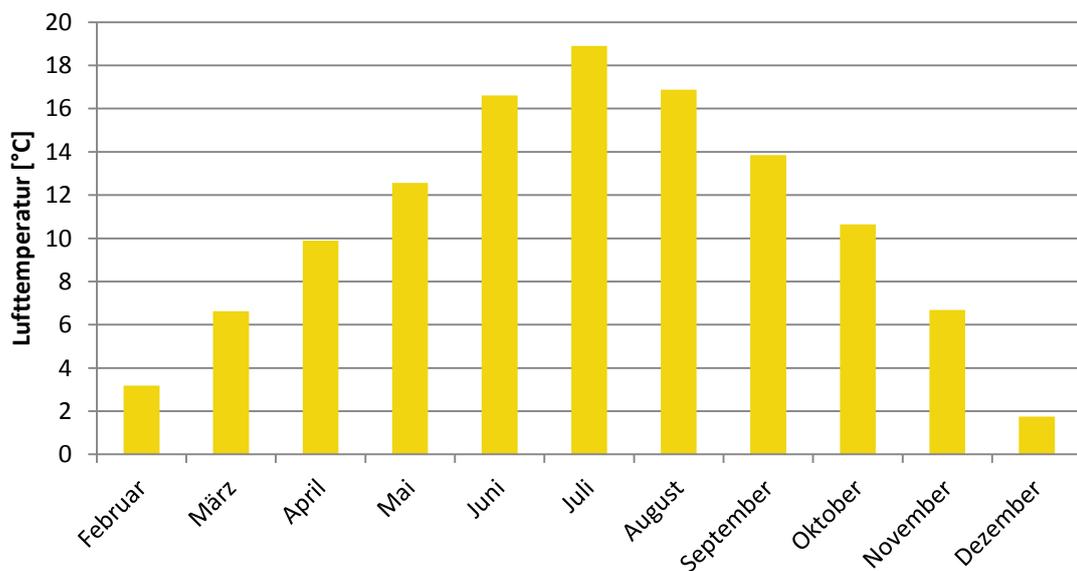


Abbildung 8: Verlauf der mittleren Monatstemperaturen.

Die mittlere Windgeschwindigkeit über den Versuchszeitraum lag bei 0,94 m s<sup>-1</sup>, die maximale mittlere Tageswindgeschwindigkeit bei 6,28 m s<sup>-1</sup> (15.5.2014), die niedrigste mittlere Tageswindgeschwindigkeit bei 0,12 m s<sup>-1</sup> (30.10.2014). Die Monate Juli bis November waren die windärmsten Monate (0,79 m s<sup>-1</sup>), die Monate März bis April die windreichsten (1,28 m s<sup>-1</sup>), wobei der Monat Mai mit einem Mittel von 1,48 m s<sup>-1</sup> der windintensivste war (Abbildung 9).

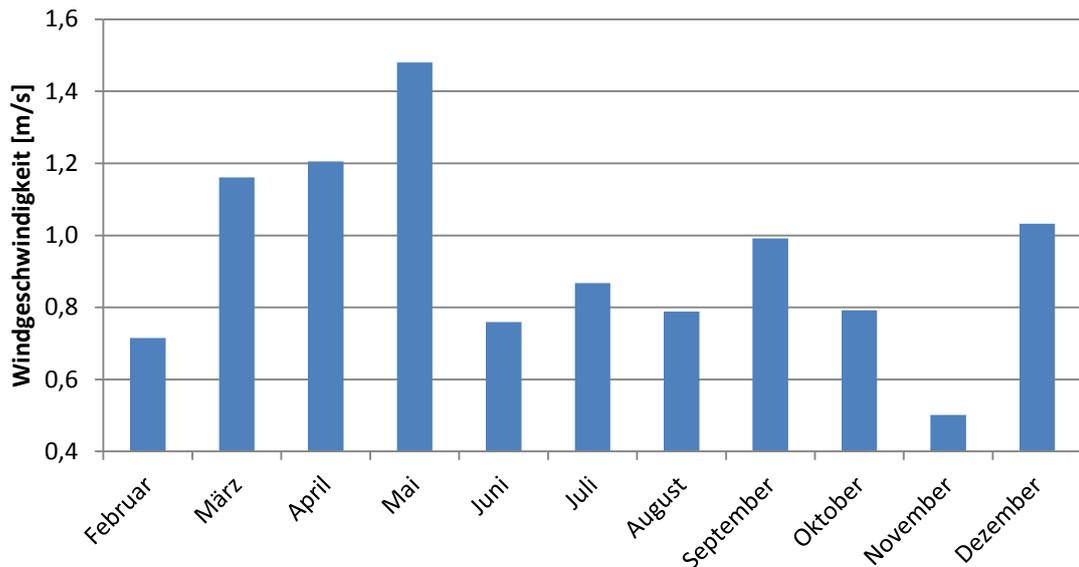


Abbildung 9: Verlauf der mittleren Monatswindgeschwindigkeiten.

Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit im Versuchszeitraum lag bei 83 %, die niedrigste relative Tagesluftfeuchtigkeit wurde am 16.03.2014 gemessen und lag bei 52 %, die höchste relative Tagesluftfeuchtigkeit wurde am 02.12.2014 gemessen und lag bei 100 %. Die Monate März bis Juni wiesen die niedrigsten Werte auf, wobei der Monat Juni die geringste mittlere relative Luftfeuchtigkeit von 72 % zeigte. Die Monate September bis Dezember wiesen die höchsten relativen Luftfeuchtigkeitswerte auf, wobei der Monat November den höchsten mittleren relativen Luftfeuchtigkeitswert von 93 % zeigte (Abbildung 10).

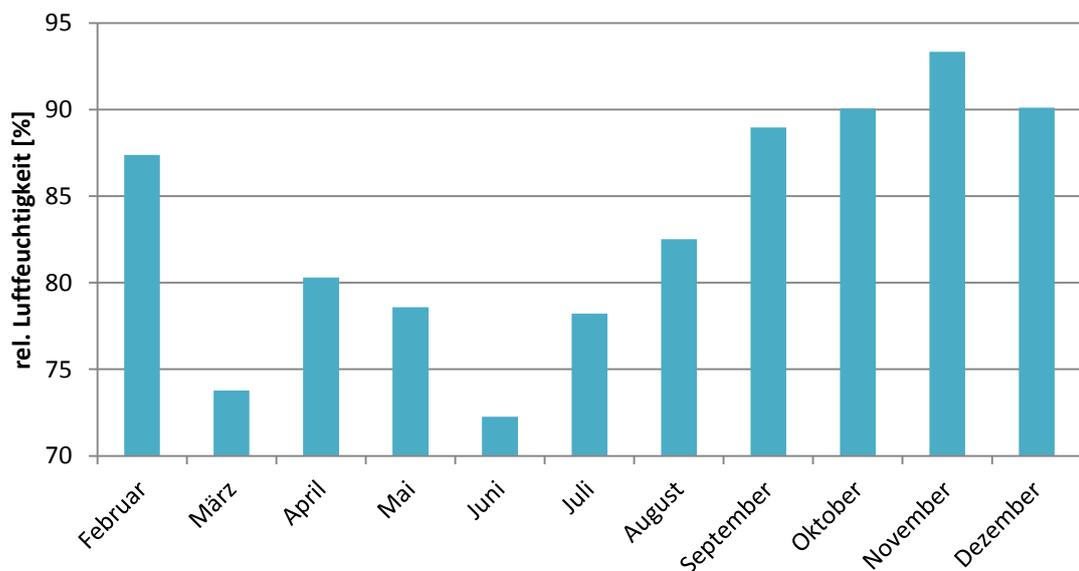


Abbildung 10: Verlauf der mittleren relativen Monatsluftfeuchten.

Die mittlere Solarstrahlung über den Versuchszeitraum lag bei  $140 \text{ W/m}^2$ , die niedrigste Tagesstrahlung wurde am 04.12.2014 mit  $3,45 \text{ W/m}^2$  gemessen, die höchste Tagesstrahlung am 10.6.2014 mit  $348 \text{ W/m}^2$  (Abbildung 11).

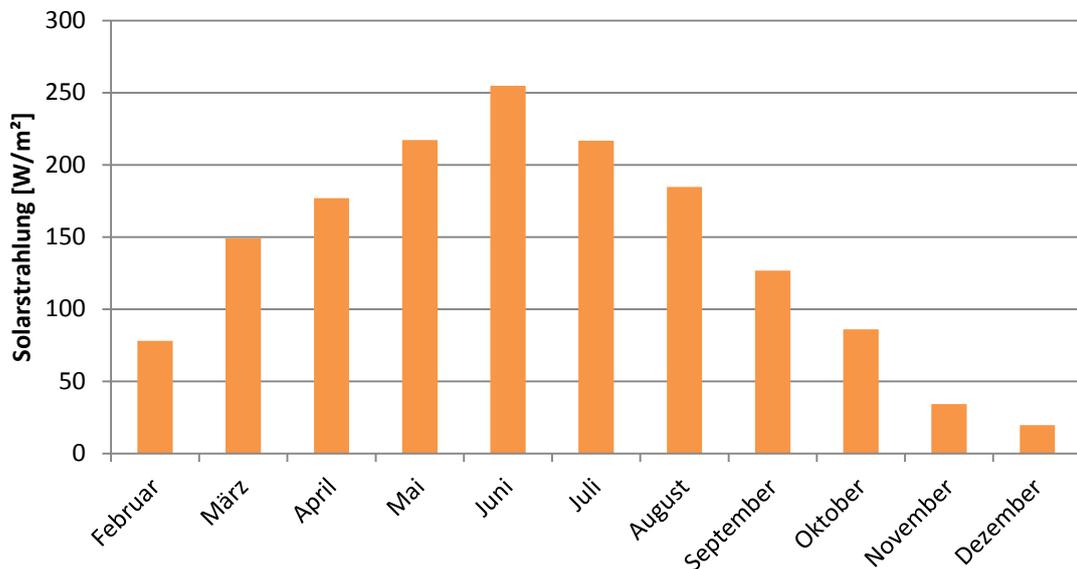


Abbildung 11: Verlauf der mittleren Monatssolarstrahlungen.

Die Unterscheidung zwischen Schnee und Regen hat am Versuchsstandort nur geringe Bedeutung und daher werden diese als Gesamtniederschlag zusammengefasst. Die Monate Mai (143 mm) und Juli (171 mm) wiesen im Mittel die höchsten Niederschlagssummen auf. Der mittlere Niederschlag betrug im Versuchszeitraum 73 mm, der höchste Tagesniederschlag wurde am 28.07.2014 mit 51 mm gemessen. In den Monaten März, April, Juni, Oktober, November und Dezember wurden geringere Niederschläge gemessen (Abbildung 12).

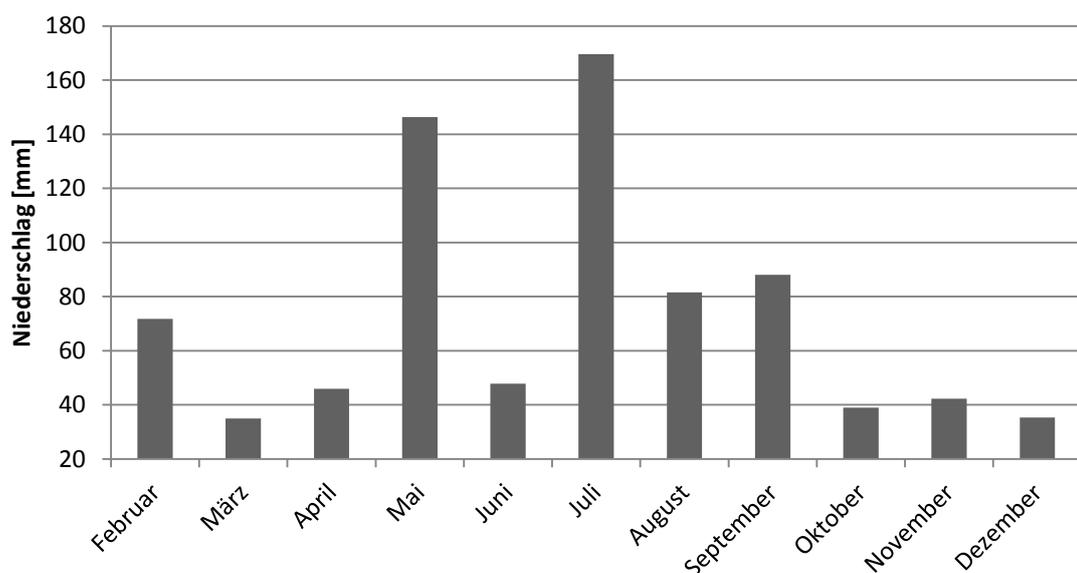


Abbildung 12: Verlauf der mittleren Monatsniederschläge.

## 5.2. Trockenmassenverluste

Buche zeigt den geringsten Trockenmassenverlust mit 3,6 %. Fichte, Eiche und Hainbuche weisen Trockenmassenverluste von 4,8 %, 5,8 % und 6,2 % auf (Abbildung 13). Bei Kiefer waren die höchsten Trockenmassenverluste (7,39 %) zu beobachten. Die Nullhypothese, dass sich die Trockenmasseverluste zwischen den Baumarten unterscheiden kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% nicht verworfen werden.

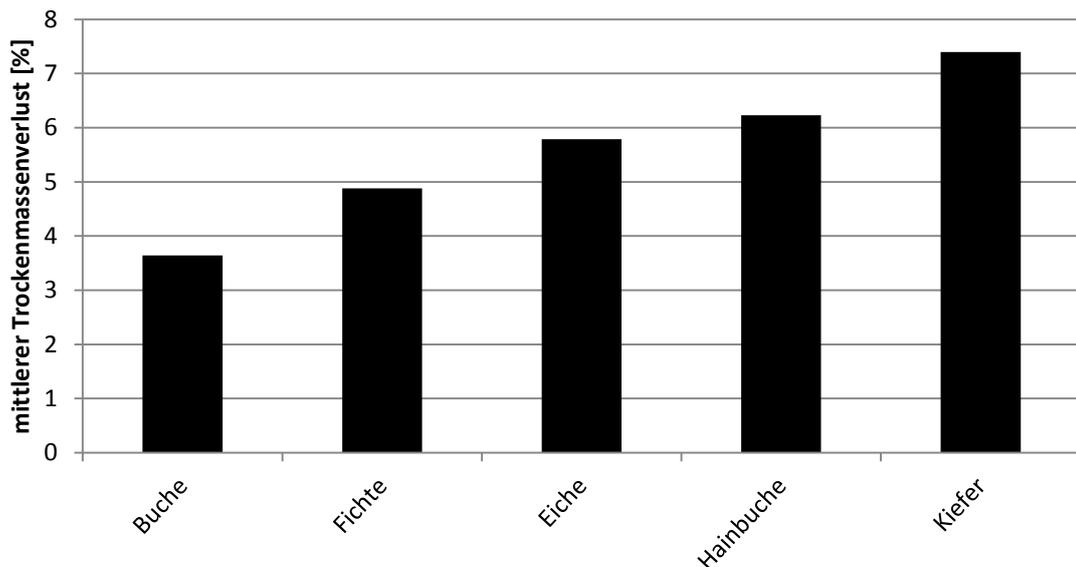


Abbildung 13: Mittlere Trockenmassenverluste nach Baumarten.

Die Trockenmassenverluste am Waldrand lagen im Mittel (5,9 %) am höchsten. Der Freilandstandort und der Waldstandort unterscheiden sich nur gering voneinander (Abbildung 14). Die Nullhypothese, dass es Unterschiede zwischen den Standorten gibt, konnte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % verworfen werden.

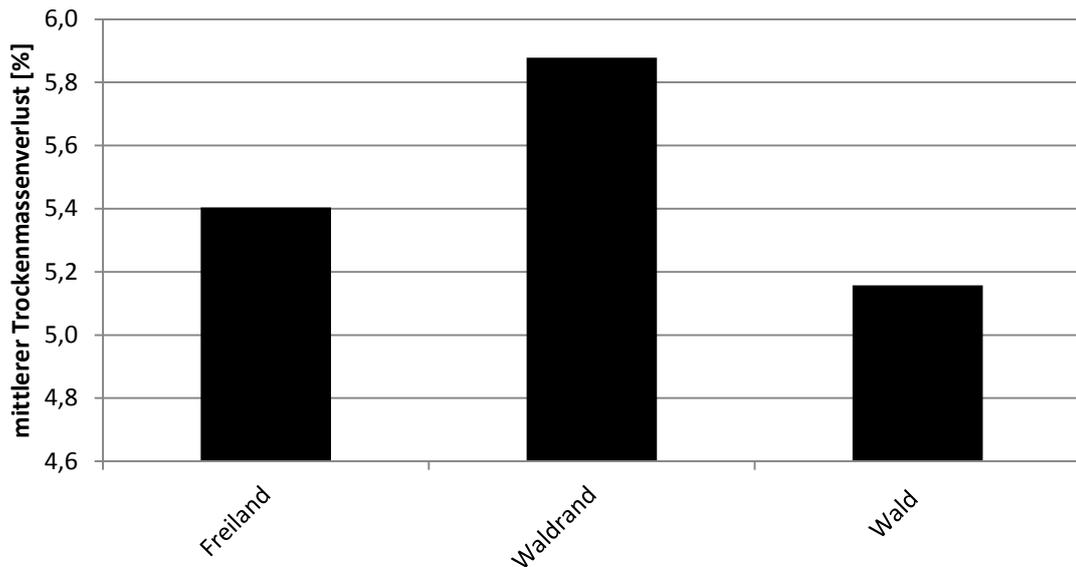


Abbildung 14: Mittlere Trockenmassenverluste nach Standorten.

Die Trockenmassenverluste der geschlossenen Lagerungsvariante sind im Mittel (5,5 %) höher als die der offenen Lagerungsvariante (4,2 %) (Abbildung 15). Die Nullhypothese, dass es Unterschiede zwischen den Lagerungsvarianten gibt, konnte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % verworfen werden.

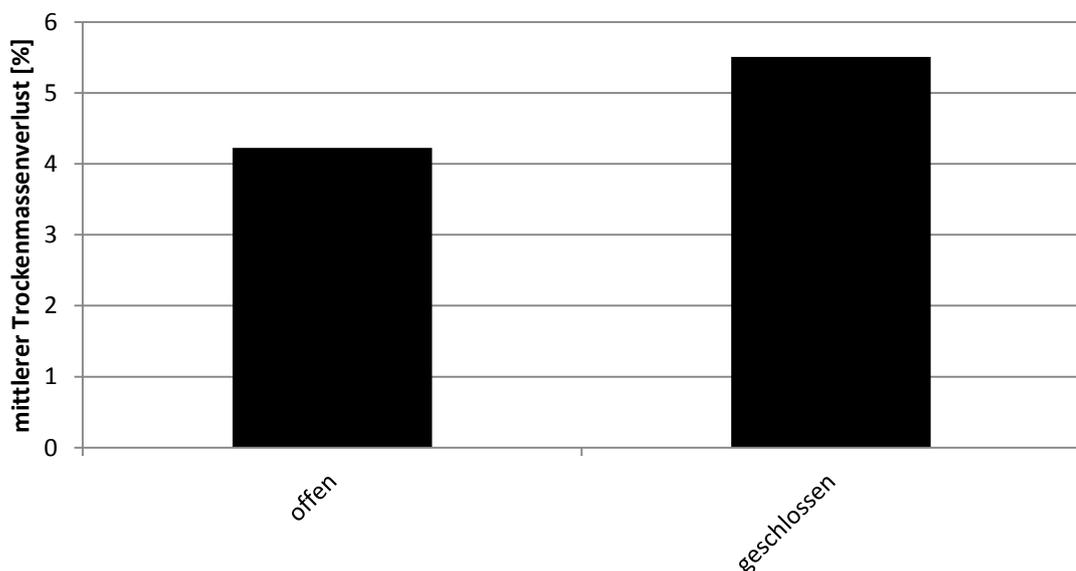
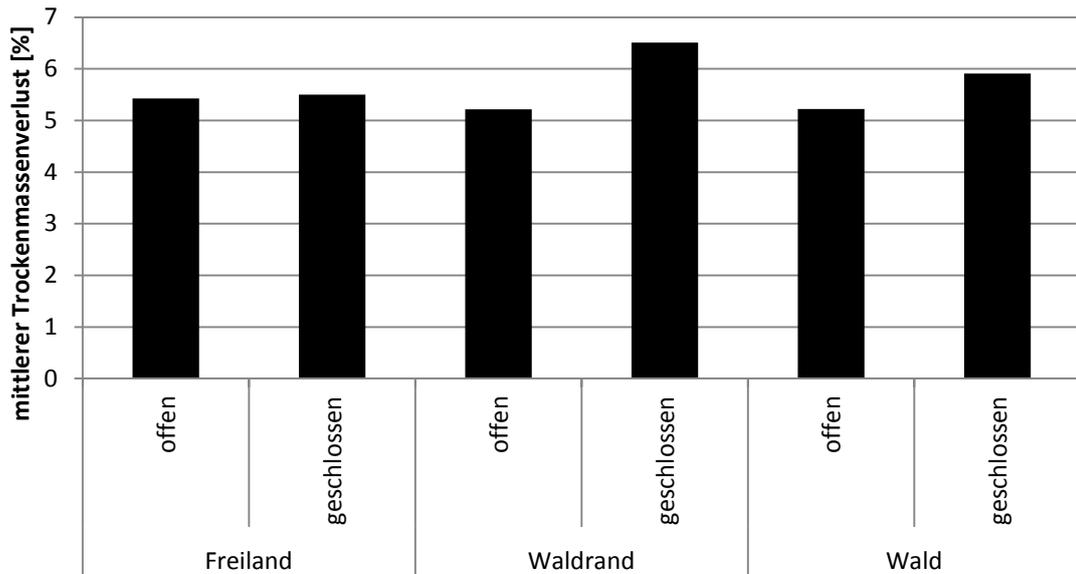


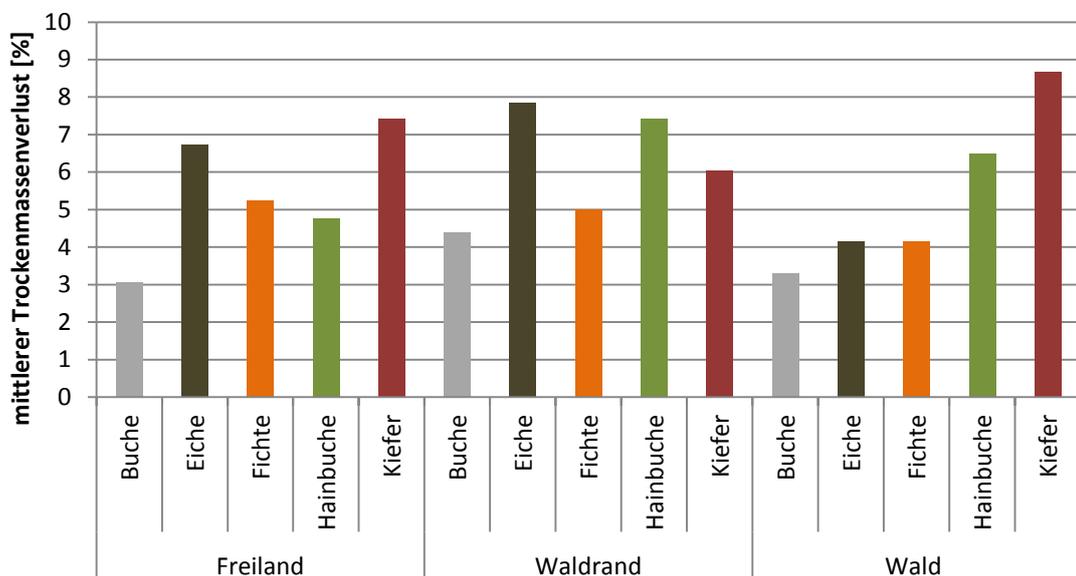
Abbildung 15: Mittlere Trockenmassenverluste nach Lagerungsvarianten.

Die Trockenmassenverluste nach Standorten getrennt nach Lagerungsvariante zeigen ein ähnliches Verhalten (Abbildung 16). Dabei sind sich die offenen Lagerungsvarianten am ähnlichsten.



**Abbildung 16: Mittlere Trockenmassenverluste nach Standorten und getrennt nach Lagerungsvarianten.**

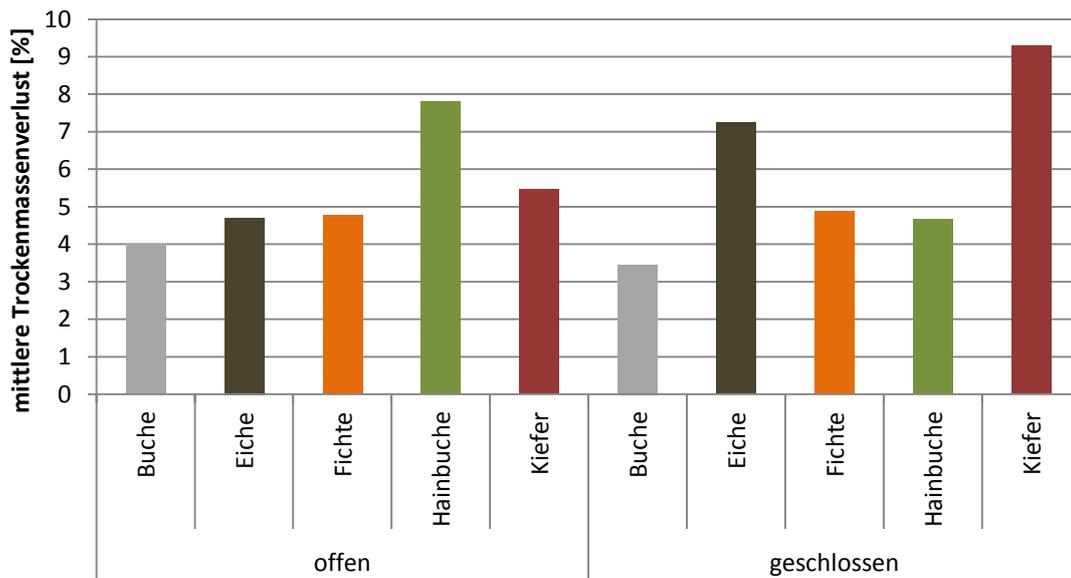
Abbildung 17 zeigt die mittleren Trockenmassenverluste nach Standorten und getrennt nach Baumarten. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % konnte die Nullhypothese, dass es Unterschiede zwischen den Trockenmassenverlusten der fünf Baumarten auf den drei Standorten gibt, verworfen werden.



**Abbildung 17: Mittlere Trockenmassenverluste nach Baumarten auf den Standorten Freiland, Waldrand und Wald.**

Die Trockenmassenverluste bei Buche sind bei beiden Lagerungsvarianten am geringsten, während Kiefer bei der geschlossenen Lagerungsvariante mit 9,3 % den höchsten Trockenmassenverlust zeigt, gefolgt von Eiche mit 7,2 %. Bei der

offenen Lagerungsvariante weist Hainbuche mit 7,8 % die größten Verluste auf, gefolgt von der Kiefer mit 5,5 % (Abbildung 18). Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % konnte die Nullhypothese verworfen werden, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Trockenmassenverlust der Baumarten und der Lagerungsvariante „offen“ gibt. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % konnte allerdings die Nullhypothese, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Trockenmassenverlust der Baumarten und der Lagerungsvariante „geschlossen“ gibt, nicht verworfen werden.



**Abbildung 18: Mittlere Trockenmassenverluste nach Lagerungsvariante getrennt nach Baumart.**

## **Zusammenfassung**

Die Trockenmassenverluste unterscheiden sich mit wenigen Ausnahmen nicht.

Folgende Trockenmassenverluste unterscheiden sich signifikant:

- Die der Baumarten, gemittelt über alle Standorte und Lagerungsvarianten.
- Die der Baumarten, gemittelt in der Lagerungsvariante „geschlossen“ über alle Standorte.

Folgende Trockenmassenverluste unterscheiden sich hingegen nicht signifikant:

- Die der Standorte, gemittelt über alle Lagerungsvarianten und alle Baumarten.
- Die der Lagerungsvarianten, gemittelt über alle Standorte und alle Baumarten.
- Die der Baumarten auf den Standorten, gemittelt über alle Lagerungsvarianten
- Die der Baumarten in den Lagerungsvarianten „offen“, gemittelt über alle Standorte.

### 5.3. Trocknungsverlauf

Zum Start des Versuchs am 10.02.2014 wurde der Wassergehalt der fünf Baumarten ermittelt. Zu Beginn hatten diese folgenden Wassergehalt: Buche 43 %, Eiche 39 %, Fichte 50 %, Hainbuche 41 % und Kiefer 47 %. Abbildung 19 zeigt, dass in den ersten fünf Monaten die Trocknung bei Fichte und Kiefer im Vergleich zu den anderen Baumarten schneller und erfolgreicher verlief. Trotz eines niedrigeren Startwassergehalts konnten Buche, Eiche und Hainbuche diese bis zum Ende nicht einholen. Am 12.12.2014 wurde der Versuch beendet und folgende Wassergehalte gemessen: Buche 23 %, Eiche 27 %, Fichte 21 %, Hainbuche 25 % und Kiefer 22 %. Zwischen Anfangswassergehalt und Endwassergehalt ergeben sich somit folgende Differenzen: Buche 20 %, Eiche 12 %, Fichte 29 %, Hainbuche 16 % und Kiefer 25 %. Fichte und Kiefer zeigten also die stärkste Wassergehaltsabnahme.

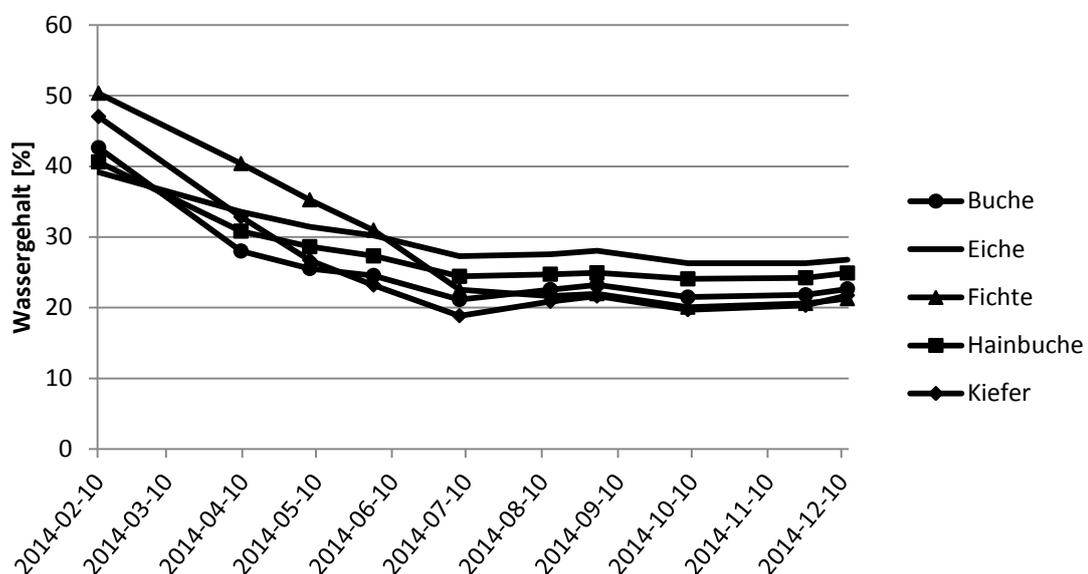


Abbildung 19: Trocknungsverlauf über den Versuchszeitraum nach Baumarten.

Der Ausgangswassergehalt lag bei allen Standorten im Mittel bei 44 %. Der Waldstandort zeigt im Vergleich zu Freiland und Waldrand eine geringere Wassergehaltsabnahme (Abbildung 20). Die Wassergehaltsunterschiede zwischen den Standorten sind in den Sommermonaten eindeutig. Am Ende des Versuchszeitraums sind die Wassergehaltsunterschiede zwischen Freiland (23 %), Waldrand (22 %) und Wald (24 %) nur gering.

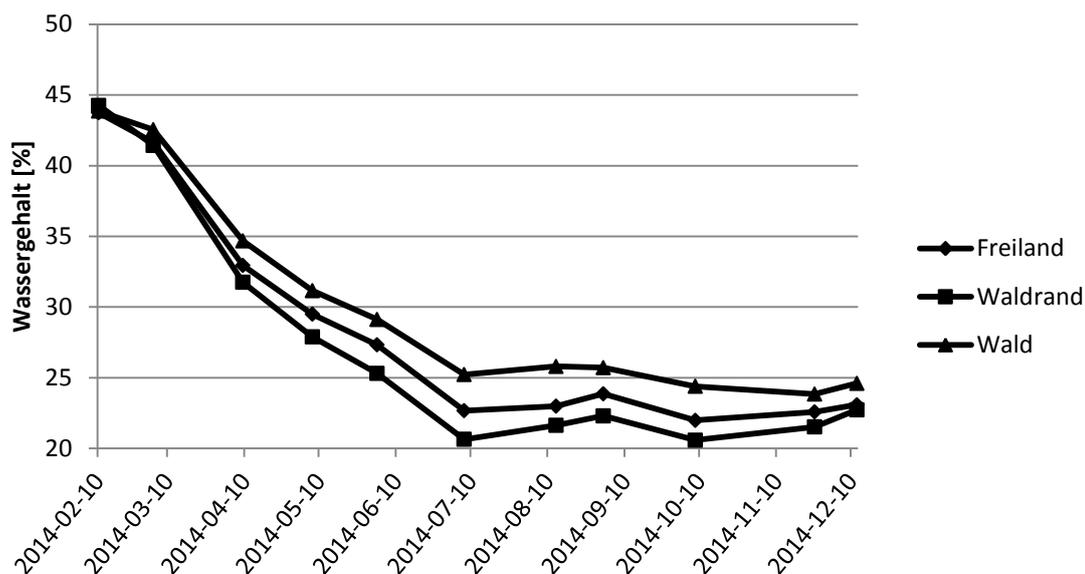


Abbildung 20: Trocknungsverlauf im Versuchszeitraum nach Standorten.

Der Trocknungsverlauf der Lagerungsvarianten unterscheidet sich sichtbar (Abbildung 21). Bei der Lagerungsvariante geschlossen konnte im Vergleich zur Lagerungsvariante offen im Mittel eine schnellere Trocknung und ein konstanterer Trocknungsverlauf beobachtet werden. Der Startwassergehalt beider Varianten lag im Mittel bei 44 %. Der mittlere Wassergehalt konnte bei der Lagerungsvariante „offen“ auf 25 % und bei der Lagerungsvariante „geschlossen“ auf 21 % gesenkt werden.

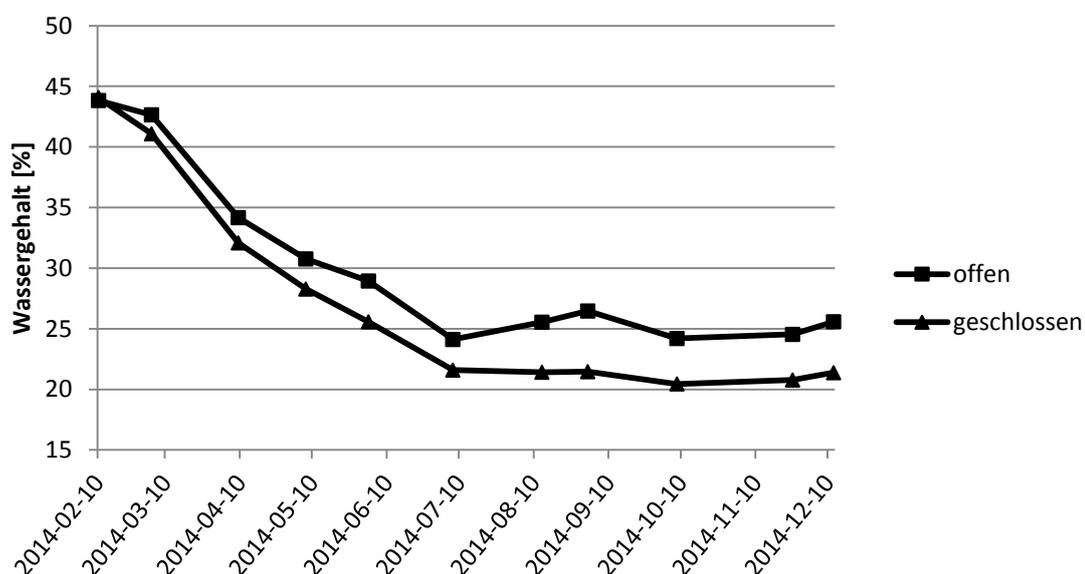


Abbildung 21: Trocknungsverlauf im Versuchszeitraum nach Lagerungsvarianten.

Tabelle 7 zeigt die mittleren Darrdichte- und Wassergehaltsabnahmen nach Standorten, Lagerungsvarianten und Baumarten. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % konnte die Hypothese, dass es signifikante Unterschiede zwischen der Darrdichte zu Beginn und zu Ende des Versuchs in Bezug auf Standort, Lagervariante und Baumart gibt, verworfen werden. Die

Hypothese, dass es signifikante Unterschiede im Wassergehalt zu Beginn und zu Ende des Versuchs in Bezug auf Standort, Lagervariante und Baumart gibt konnte hingegen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht verworfen werden.

**Tabelle 7: Wassergehalts- und Trockenmassenmittelwerte zu Beginn und Ende der Aufnahmen und deren Differenzen.**

Lagerungsart	Lagerungs- variante	Baumart	Darrdichte	Darrdichte	Darrdichte	Wassergehalt	Wassergehalt	Wassergehalt
			Beginn	Ende	Differenz	Beginn	Ende	Differenz
			kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	%	%
Freiland	offen	Buche	715	688	27	43,2	23,6	19,6
		Fichte	737	696	41	49,6	18,4	31,3
		Eiche	501	474	27	40,1	29,8	10,4
		Kiefer	780	743	37	48,4	25,7	22,7
		Hainbuche	430	398	32	40,0	27,6	12,3
	geschlossen	Buche	725	721	4	42,7	22,0	20,7
		Fichte	760	739	21	46,9	19,9	27,0
		Eiche	501	498	3	39,0	22,7	16,3
		Kiefer	767	731	36	47,8	19,2	28,6
		Hainbuche	495	481	14	39,9	22,2	17,7
Waldrand	offen	Buche	707	681	26	43,3	23,4	19,9
		Fichte	717	698	19	55,8	23,7	32,1
		Eiche	457	451	6	38,7	28,7	10,0
		Kiefer	768	700	68	45,5	23,1	22,4
		Hainbuche	529	519	10	41,6	25,4	16,2
	geschlossen	Buche	749	710	39	40,1	19,4	20,7
		Fichte	724	697	27	51,4	18,8	32,5
		Eiche	494	469	25	38,8	25,1	13,7
		Kiefer	771	723	48	45,2	17,8	27,3
		Hainbuche	536	519	17	42,3	21,9	20,3
Wald	offen	Buche	734	710	24	41,9	26,3	15,6
		Fichte	730	702	28	43,4	26,5	16,9
		Eiche	524	502	22	38,0	28,0	10,0
		Kiefer	778	702	76	46,8	25,4	21,4
		Hainbuche	512	503	9	41,0	28,2	12,9
	geschlossen	Buche	730	705	25	44,5	21,3	23,2
		Fichte	754	724	30	54,9	20,3	34,5
		Eiche	489	475	14	40,5	26,5	13,9
		Kiefer	781	756	25	48,6	19,4	29,2
		Hainbuche	477	456	21	38,9	24,1	14,8

## **Zusammenfassung**

Zu Beginn des Versuchs wurden die Wassergehalte aller Stammstücke erhoben. Diese dienten als Ausgangswerte für die Darstellung des Trocknungsverlaufs. Der Ausgangswassergehalt lag im Mittel bei 44 %. Bis Periode sechs konnte bei den Baumarten Fichte und Kiefer, im Vergleich zu den anderen Baumarten, eine schnellere Wassergehaltsabnahme beobachtet werden. Die Baumarten Fichte und Kiefer starteten mit dem höchsten Wassergehalt und holten bis Periode fünf Buche, Eiche und Hainbuche in der Wassergehaltsabnahme ein. Bis zum Versuchsende zeigten Fichte und Kiefer die insgesamt stärkste Wassergehaltsabnahme. Die mittleren Anfangs- und Endwassergehalte nach Standorte weichen kaum voneinander ab. Nur während der Sommermonate konnten deutliche Unterschiede in den Wassergehalten erkannt werden. Bis Periode fünf zeigte die geschlossene Lagerungsvariante einen erheblichen Vorsprung in der Wassergehaltsabnahme, den sie beibehalten.

## 5.4. Trocknungseffizienz

Die kumulierten Wassergehaltsabnahmen nach Baumarten (Abbildung 22) zeigen einen eindeutig unterschiedlichen Verlauf. Bis Periode fünf erfolgte bei allen Baumarten eine konstante Wassergehaltsabnahme, wobei die Fichte und Kiefer die höchste Trocknungseffizienz zeigten. Zwischen dem fünften und dem neunten Monat waren Wassergehaltszunahmen und zwischen dem siebentem und dem achten Monat Wassergehaltsabnahmen zu beobachten. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % konnte die Nullhypothese, dass es zwischen den Baumarten Unterschiede im Verlauf der Wassergehaltsabnahme gibt, nicht verworfen werden.

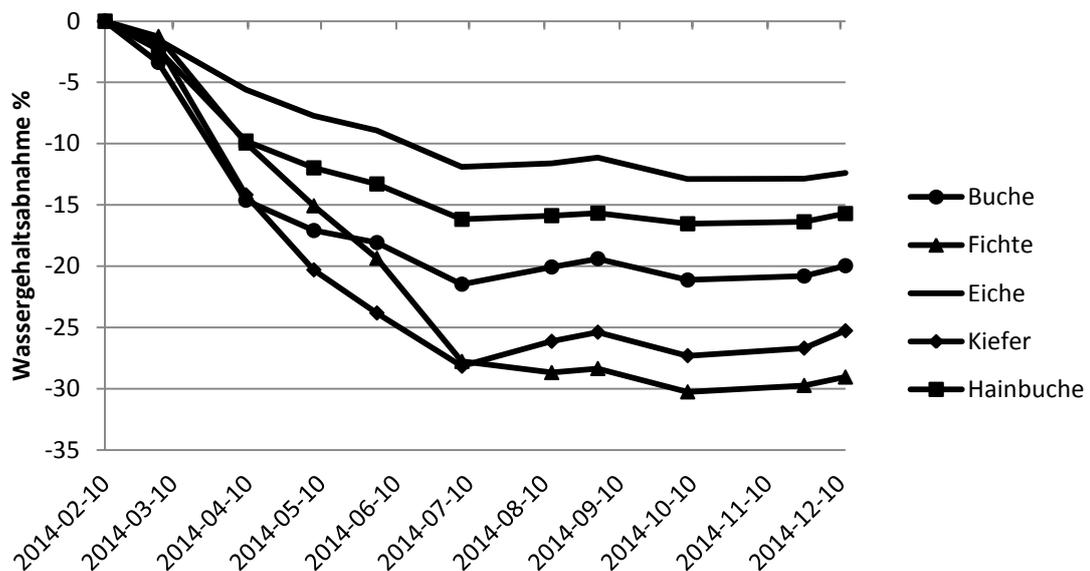


Abbildung 22: Kumulierte Wassergehaltsabnahme nach Baumarten.

Die kumulierte Wassergehaltsabnahme nach Standorten (Abbildung 23) unterscheidet sich in der Trocknungseffizienz nur marginal. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % konnte die Nullhypothese, dass sich die Standorte im Verlauf ihrer Wassergehaltsabnahme unterscheiden, nicht verworfen werden.

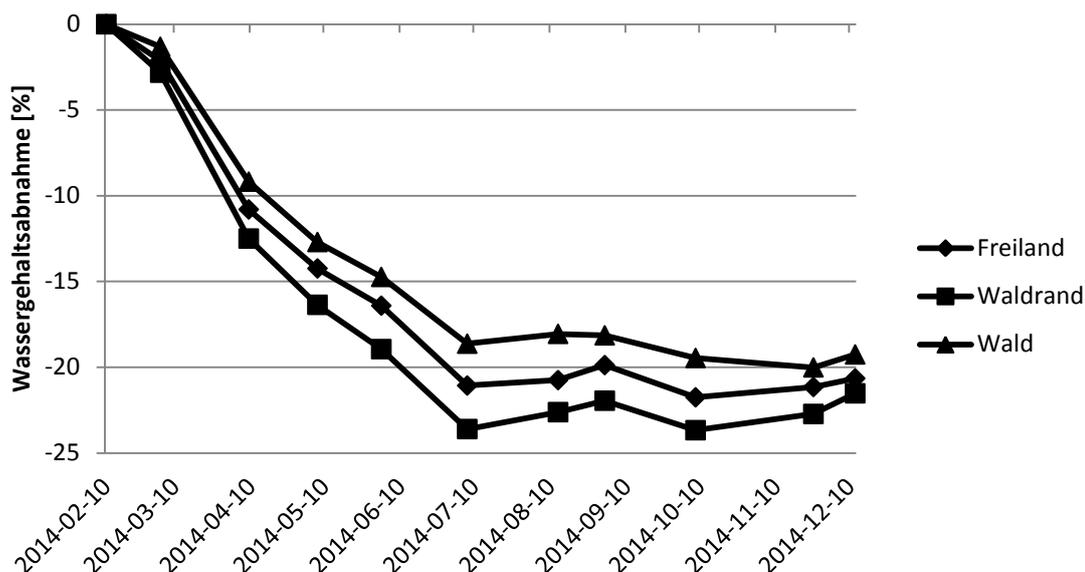


Abbildung 23: Kumulierte Wassergehaltsabnahme gemittelt nach Standorten.

Die kumulierte Wassergehaltsabnahme nach Lagerungsvarianten (Abbildung 24) unterscheidet sich hinsichtlich ihres Verlaufs eindeutig. Die Trocknungseffizienz der offenen Lagerungsvariante ist stärker als die der geschlossenen. Letztere zeigt eine konstante Trocknungseffizienz über den gesamten Versuchszeitraum. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % kann die Nullhypothese, dass sich der Verlauf der Wassergehaltsabnahmen der Lagerungsvarianten unterscheidet, nicht verworfen werden.

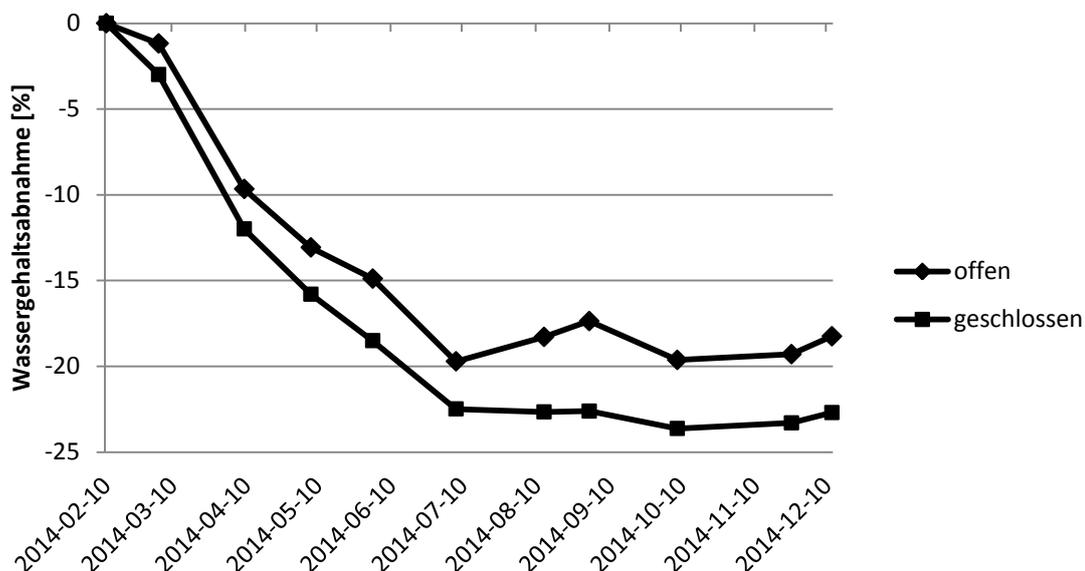
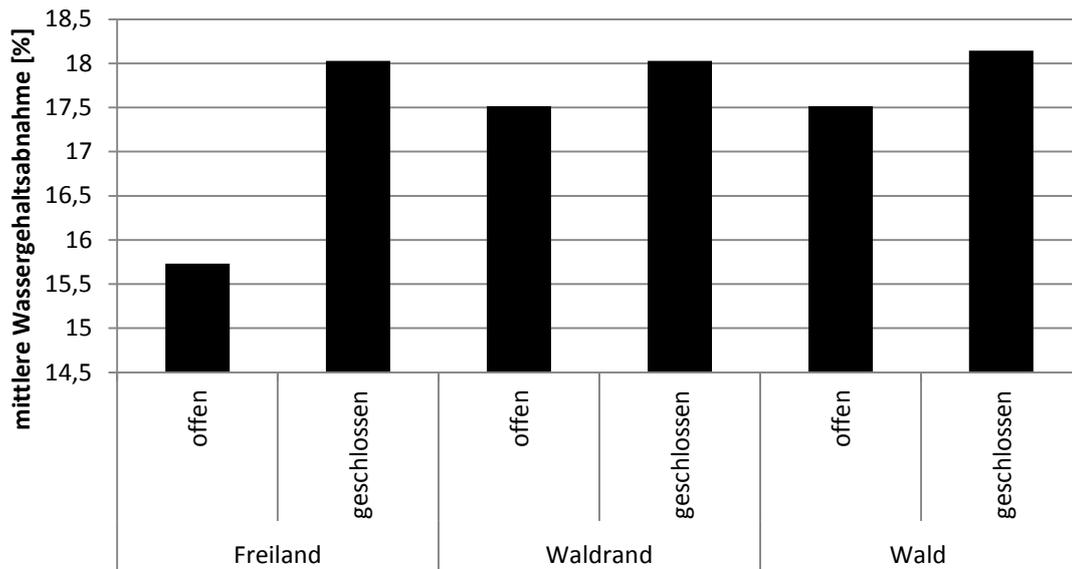


Abbildung 24: Kumulierte Wassergehaltsabnahme gemittelt nach Lagerungsvarianten.

Während sich die Standorte in ihrer mittleren Wassergehaltsabnahme in den geschlossenen Lagerungsvarianten nur gering unterscheiden, tun sie dies in der offenen Lagerungsvariante eindeutig (Abbildung 25).



**Abbildung 25: Mittlere Wassergehaltsabnahme gemittelt nach Standorten getrennt nach Lagerungsvarianten.**

### Zusammenfassung

Bei der kumulierten Wassergehaltsabnahme handelt es sich um eine Aufsummierung der Wassergehaltsänderungen über den Versuchszeitraum und drückt den Trocknungserfolg der einzelnen Baumarten, Standorte und Lagerungsvarianten aus. Dabei wurden die Zusammenhänge von Standort, Lagerungsvariante und Baumart in Bezug auf ihre Trocknungsleistung geprüft.

Folgende Wassergehaltsabnahmen unterscheiden sich signifikant:

- Zwischen den Baumarten, gemittelt über alle Standorte und Lagerungsvarianten.
- Zwischen den Standorten, gemittelt über alle Lagerungsvarianten und Baumarten.
- Zwischen den Lagerungsvarianten, gemittelt über alle Standorte und Baumarten.

## 5.5. Modellierung

Ein Wassergehaltsänderungsmodell wurde für die fünf Baumarten und zwei Lagerungsvarianten erstellt. Dabei ist die Wassergehaltsänderung eine Funktion von Baumart, Lagerungsvariante und Wettervariablen.

Mittels ANOVA wurde eine Funktion (Formel 5) für die Wassergehaltsänderung erstellt. Tabelle 8 zeigt die Schätzungen und Signifikanzen der berechneten Koeffizienten. Für das Modell wurden nur jene Parameter herangezogen, die bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% statistisch signifikant waren.

Tabelle 8: Koeffizienten.

Koeffizienten	Schätzung	t-Wert	t-Wert, $\alpha=0,05$	Signifikanzniveau
<i>Fixterm</i>	119.674.740	10.386	$2,00 \times 10^{-16}$	***
Offenen Variante	-0.419667	-2.334	0.01993	*
Eiche	-0.821167	-2.888	0.00401	**
Fichte	0.846417	2.977	0.00303	**
Hainbuche	-0.488167	-1.717	0.08648	.
Kiefer	0.468417	1.648	0.09995	.
Wald	-0.102150	-0.464	0.64291	
Waldrand	0.087100	0.396	0.69259	
Tage	0.092369	7.072	$4.37 \times 10^{-12}$	***
Temperatur	-0.313174	-5.976	$3.97 \times 10^{-9}$	***
Relative Luftfeuchtigkeit	-0.371815	-7.017	$6.29 \times 10^{-12}$	***
Solarstrahlung	0.003810	0.540	0.58954	
Niederschlag	-0.012586	-4.060	5.57e-05	***

$$WG = 119.674 + a * Baumart + b * Variante + c * D + d * TC + e * RH + f * P$$

*WG*.....Wassergehaltsänderung pro Periode [%]

*D*.....Tage des Lagerungszeitraums [Anzahl]

*TC*.....Mittlere Tageslufttemperatur [K]

*RH*.....Mittlere relative Tagesluftfeuchtigkeit [%]

*P*.....Summe des Tagesniederschlages [mm]

Formel 5: Funktion der Wassergehaltsänderung.

Tabelle 9: Koeffizienten für Formel 5.

Variable	Bezeichnung	Einheit	Koeffizienten	Code
<i>Baumart</i>	Buche	-	0	<i>a</i>
	Eiche	-	-0,821167	
	Fichte	-	0,846417	
	Hainbuche	-	0	
	Kiefer	-	0	
<i>Variante</i>	offen	-	0	<i>b</i>
	geschlossen	-	- 0,419667	
<i>D</i>	Tage	Anzahl	0,088108	<i>c</i>
<i>TC</i>	Temperatur	K	- 0,290239	<i>d</i>
<i>RH</i>	Luftfeuchtigkeit	%	- 0,398934	<i>e</i>
<i>P</i>	Niederschlag	Mm	- 0,012218	<i>f</i>

Die Schätzungen der Wassergehaltsänderungsmodelle für die fünf Baumarten und beide Lagerungsvarianten sind in Abbildung 24 dargestellt. Die gepunkteten Linien stellen die mittleren gemessenen Wassergehalte und die durchgezogenen Linien die Modellschätzung dar. Die grünen Linien kennzeichnen die geschlossene und die roten Linien die offenen Lagerungsvarianten, während die Punkte die gemessenen Werte abbilden.

#### – **Buche**

Das Modell zeigt grundsätzlich ein brauchbares Ergebnis. Die geschlossen Lagerungsvariante zeigt dabei im Vergleich zur offenen Lagerungsvariante eine konstante Wassergehaltsänderung mit geringen Abweichungen zu den Messwerten. In den ersten vier Perioden wird bei beiden Lagerungsvarianten die Wassergehaltsänderung unterschätzt. Von Periode vier bis acht wird die Wassergehaltsänderung der geschlossen Lagerungsvariante unterschätzt und die der offenen Lagerungsvariante gering überschätzt. Von Periode acht bis zehn wird die Wassergehaltsänderung der offenen Lagerungsvariante unterschätzt und jene der geschlossenen Lagerungsvariante überschätzt.

#### – **Eiche**

Das Modell zeigt kein plausibles Ergebnis. Von Periode zwei bis vier wird die Wassergehaltsänderung bei beiden Lagerungsvarianten überschätzt. Von Periode vier bis acht wird die Wassergehaltsänderung der geschlossenen Lagerungsvariante nur gering, die der offenen Lagerungsvariante extrem überschätzt. Von Periode acht bis zehn sind die Modellschätzungen den beiden Lagerungsvarianten nahezu ident. Ist nur der Endwassergehalt von Interesse, so könnte das Modell für Eiche gute Ergebnisse liefern.

– **Fichte**

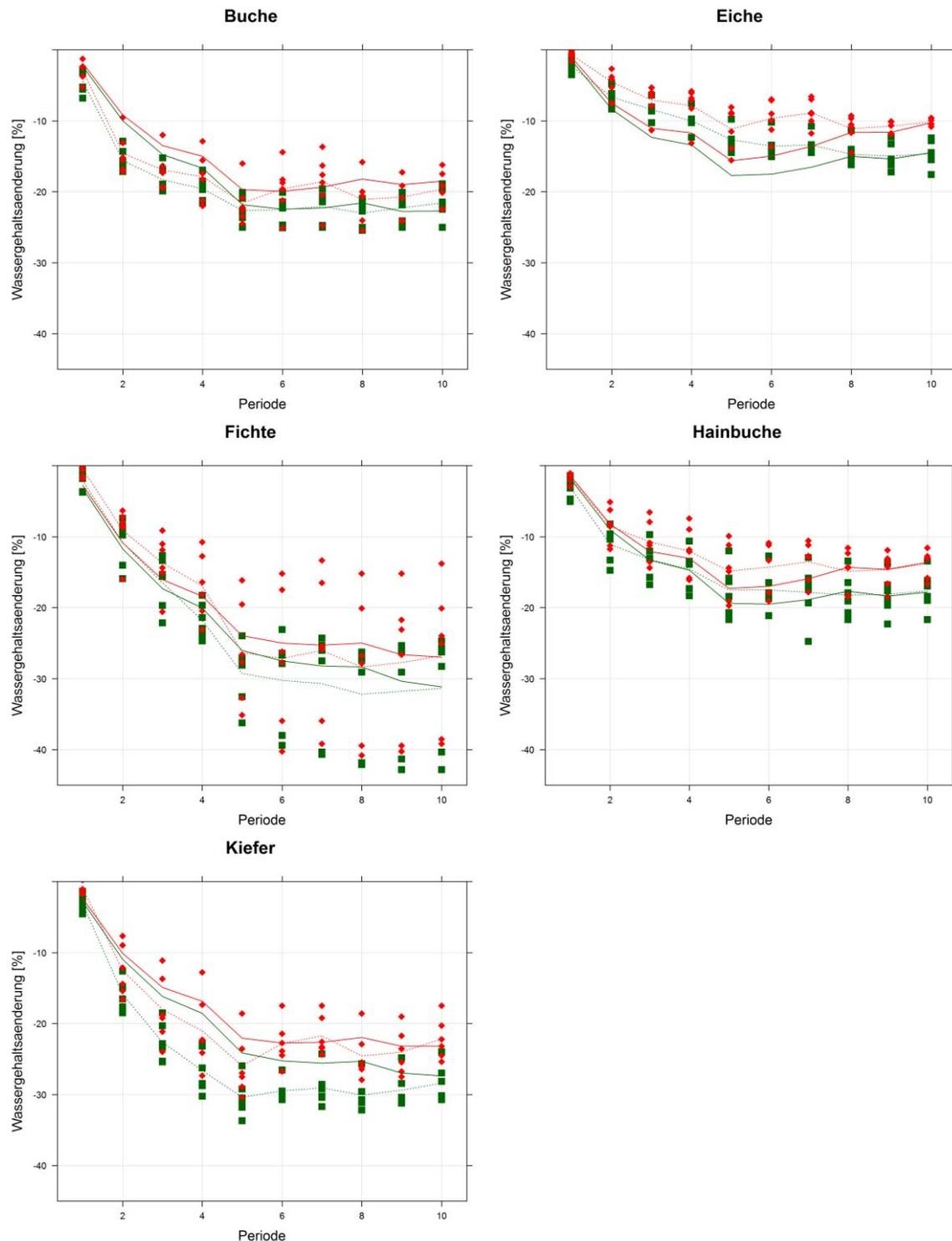
Das Modell zeigt ein brauchbares Ergebnis. Über die gesamten Perioden zeigt sich ein konstanter Verlauf beider Lagerungsvarianten mit nur geringen Abweichungen. Von Periode zwei bis vier werden die Wassergehaltsänderungen leicht überschätzt. Von Periode vier bis acht wechselt das Modell zu geringen Unterschätzungen in der Wassergehaltsänderung. Von Periode acht bis zehn sind bei der offenen Lagerungsvariante geringere und bei der geschlossenen Lagerungsvariante größere Unterschätzungen in der Wassergehaltsänderung zu erkennen. Insgesamt streuen aber die Messwerte sehr stark.

– **Hainbuche**

Das Modell zeigt ein brauchbares Ergebnis. Von Periode zwei bis vier unterschätzt das Modell die geschlossene Lagerungsvariante und überschätzt die offene Lagerungsvariante. Dieser Trend ist mit geringen Abweichungen bis Periode acht zu beobachten. Ab Periode acht ist das Modell nahezu ident mit den Messwerten. Über die gesamten Perioden betrachtet zeigt das Modell sehr konstante Wassergehaltsänderungen mit geringen Abweichungen zu den Messwerten.

– **Kiefer**

Das Modell unterschätzt die Wassergehaltsänderung massiv und liefert kein brauchbares Ergebnis. Von Periode zwei bis vier wird die Wassergehaltsänderung beider Lagerungsvarianten markant unterschätzt. Von Periode vier bis zehn nähert sich das Modell bei der offenen Lagerungsvariante den Messwerten gut an. Hingegen bei der geschlossenen Lagerungsvariante wird die Wassergehaltsänderung eindeutig unterschätzt. Betrachtet über die gesamten Versuchsperioden zeigt die offene Lagerungsvariante einen konstanteren Verlauf im Vergleich zur geschlossenen Variante.



**Abbildung 26: Wassergehaltsänderungsmodelle der fünf Baumarten und deren Lagerungsvarianten. Die gepunkteten Linien stellen die mittleren gemessenen Wassergehalte und die durchgezogenen Linien die Modellschätzung dar. Die grünen Linien kennzeichnen die geschlossene und die roten Linien die offenen Lagerungsvarianten, während die Punkte die gemessenen Werte abbilden.**

## Zusammenfassung

In Tabelle 10 sind die mittleren Abweichungen und die Standardabweichung der mittels Modell geschätzten Werte von den Messwerten aufgeführt. Dabei zeigen sich bei Kiefer und Eiche hohe mittlere Abweichungen. Für diese Baumarten lieferte das Modell kein brauchbares Ergebnis. Die mittlere Abweichung war bei den Baumarten Buche, Fichte und Hainbuche geringer.

**Tabelle 10: Mittlere Abweichung der mittels Modell geschätzten Werte von den Messwerten nach Baumarten.**

<b>Baumart</b>	Variante geschlossen		Variante offen	
	<b><i>M</i></b>	<b><i>SD</i></b>	<b><i>M</i></b>	<b><i>SD</i></b>
Buche	-1,5	± 2,7	-1,9	± 3,3
Eiche	2,1	± 2,4	2,7	± 2,7
Fichte	-1,3	± 5,7	-0,2	± 7,5
Hainbuche	0,2	± 2,9	0,9	± 2,9
Kiefer	-4,2	± 3,2	-1,4	± 3,9

## 6. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Lagerung von Energieholz im Freien wird vom Wetter beeinflusst. Dies wirkt sich, je nach Lagerungsort, Lagerungsvariante und Baumart unterschiedlich auf die Trocknungsverläufe und die Trockenmassenverluste aus.

### 6.1. Trockenmassenverluste

Die Trockenmassenverluste wurden auf ihre Zusammenhänge mit den Lagerungsorten, Lagerungsvarianten und Baumarten geprüft. Dabei konnten, wahrscheinlich auch aufgrund des geringen Datenumfangs, keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Vereinzelt wurden sogar „Trockenmassenzuwächse“ beobachtet, abhängig davon an welcher Stelle die Proben gezogen wurden. Schon HÖLDRICH et al. (2006) beschrieben die Schwierigkeiten bei der Trockenmassenverlusterhebung und wiesen darauf hin, dass es sich bei diesen Ergebnissen nur um ungefähre Größenordnungen handelt. In der vorliegenden Untersuchung können aber die Mittelwerte nach Baumarten als zuverlässig angesehen werden und einen Trend für Baumarten aufzeigen: So zeigte die Buche den geringsten Trockenmassenverlust, gefolgt von Fichte, Eiche, Hainbuche und Kiefer. KALTSCHMITT et al. (2001) erwähnen eine südbayerische Untersuchung, in der bei Lagerung von Holz im Freien, Fichte einen geringeren Trockenmassenverlust als Kiefer aufwies. Die unterschiedlichen Trockenmassenverluste auf den Standorten werden stark vom Makro- bzw. Mikroklima beeinflusst. HÖLDRICH et al. (2006) beschrieben, dass die Prüfung der Lagerungsstandorte mehrerer Wiederholungen auf unterschiedlichsten Standorten bedarf, um eine verallgemeinerungsfähige Aussage machen zu können. Die Standorte sollten sich in ihren Eigenschaften deutlich unterscheiden, um Unterschiede im Trocknungserfolg besser sichtbar machen zu können. Die Trockenmassenverluste auf den offenen Lagerungsvarianten sind im Vergleich zu den geschlossenen Lagerungsvarianten geringer. Nach HARTMANN (2007) werden Trockenmassenverluste durch biologische Prozesse und dabei ganz besonders durch Pilzbefall hervorgerufen. Das Ausmaß des Pilzbefalls ist dabei abhängig von Temperatur und Feuchtigkeit. KALTSCHMITT et al. (2001) beschreiben in diesem Zusammenhang, dass bei Abdeckung von Holz der Trockenmassenverlust halbiert werden kann. Ein Grund für die geringen Trockenmassenverluste in der offenen Lagerungsvariante könnte in der ungeschützten Lage der Holzstücke, unwirtlich für temperatur- und feuchtigkeitsliebende Pilze, liegen. In ungeschützter Lage sind die Lebensbedingungen für Pilze ungünstig (BUTIN, 2011).

## 6.2. Trocknungsverlauf

Bei der Trocknung von Energieholz auf unterschiedlichen Standorten und in verschiedenen Lagerungsvarianten zeigte sich ein grundsätzlich vom Wetter abhängiger Verlauf. Ausschlaggebend für den Trocknungserfolg bei der offenen Lagerungsvariante waren das Ausmaß der Wiederbefeuchtung durch relative Luftfeuchtigkeit und Niederschlag, während bei der geschlossenen Lagerungsvariante, aufgrund der Konstruktion, nur der Effekt der Wiederbefeuchtung durch relative Luftfeuchtigkeit beobachtet werden konnte.

In den Monaten Februar und März war die geringere Wassergehaltsabnahme durch eine hohe relative Luftfeuchtigkeit, in den Monaten April und Mai durch höhere Niederschläge bedingt.

In den Sommermonaten Juli bis September konnte Wiederbefeuchtung durch hohe Niederschläge und in den Monaten September bis November durch hohe relative Luftfeuchtigkeit beobachtet werden, wie auch von KALTSCHMITT et al. (2001) beschrieben. Aus einer Untersuchung von HARTMANN (2007) ging hervor, dass durch eine Abdeckung, insbesondere an regenreichen Standorten, die Wiederbefeuchtung reduziert werden kann.

## 6.3. Trocknungseffizienz

Für die Verfeuerung von Energieholz in Kleinanlagen ist ein Wassergehalt von mindestens 20 % erforderlich. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Form der Aufbereitung und der Lagerungsform (HARTMANN, 2007). Zu Beginn des Versuchs lag der Startwassergehalt der Baumarten im Mittel bei 44%. In den ersten fünf Monaten Februar bis Juli konnte im Mittel eine Wassergehaltsreduktion um 22 % beobachtet werden. HARTMANN (2007) beschrieb die steigenden Trocknungsraten ab dem Monat März. Unter günstigen Lagerungsbedingungen ist ein Erreichen des gewünschten Wassergehalts von unter 20 % möglich. Nach weiteren fünf Monaten zeigte sich im Mittel eine geringere Wassergehaltszunahme durch Wiederbefeuchtung. Nach fünf Monaten Trocknung erreichte die Baumart Kiefer (18 %) den gewünschten Wassergehalt. Hingegen verfehlten die Baumarten Buche (21 %) und Fichte (22 %) nur knapp und die Baumarten Eiche (27 %) und Hainbuche (24 %) deutlich das Ziel von 20 % Wassergehalt. Trotz des hohen Startwassergehalts der Nadelbaumarten Fichte (50 %) und Kiefer (47 %) zeigten diese in den ersten fünf Monaten die beste Trocknungsleistung. Schon HÖLDRICH et al. (2006) erkannten in ihrer Untersuchung die hohe Trocknungsleistung bei Fichte und Kiefer. Zu Beginn und zu Ende sind keine eindeutigen standörtlichen Unterschiede im Wassergehalt zu erkennen. Nach fünf Monaten Trocknung wurden am Waldrandstandort 20 % am Freilandstandort 22 % und am Waldstandort 25 % erreicht. Nach den ersten fünf Monaten waren zwischen den Standorten die größten Wassergehaltsunterschiede zu erkennen. Dies wäre der angemessenen Zeitpunkt für die weitere Verarbeitung des Materials, wollte man diesen Effekt vollständig ausnützen. Bei den Lagerungsvarianten

zeigte die geschlossene Variante einen konstanten Trocknungsverlauf, im Gegenteil zur offenen Variante. Nach fünf Monaten Trocknung verpasste die geschlossene Variante mit im Mittel von 21 % nur knapp und die offene Variante mit im Mittel von 24 % deutlicher den angestrebten Wassergehalt von 20 %. Auch hier zeigt sich der Vorteil durch die Abdeckung.

#### **6.4. Lagerungsdauer**

Die Lagerungsdauer ist ein entscheidender Faktor bei der Energieholztrocknung. HÖLDRICH et al. (2006) zeigten, dass es innerhalb von 0,5 bis 2 Jahre möglich ist den gewünschten Wassergehalt von unter 20 % zu erreichen. Wird der Zielwassergehalt in den Sommermonaten vor der Wiederbefeuchtung nicht erreicht, so muss ein weiteres Trocknungsjahr angehängt werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Kiefer, Buche und Fichte ein halbes Jahr und Hainbuche und Eiche eine zweijährige Trocknungszeit benötigten. Untersuchungen von HÖLDRICH et al. (2006) zeigten weiter, dass Buche, Fichte und Kiefer abhängig von Witterung nach sechsmonatiger Lagerung ofenfertige Trocknungszustände erreichten. Bei den untersuchten Standorten würden sich eine halbjährliche Trocknungszeit beim Waldrand und eine zweijährige Trocknungszeit beim Freiland und Wald ergeben. Bei den Lagerungsvarianten würden sich eine halbjährliche Trocknungszeit bei der geschlossenen Variante und eine zweijährige Trocknung bei der offenen Variante ergeben. HÖLDRICH et al. (2006) beschrieben in diesem Zusammenhang den positiven Effekt einer Abdeckung. Dadurch kann eine Reduzierung der Trocknungsdauer durch Verhinderung der Wiederbefeuchtung durch Niederschlag erfolgen.

Die angeführten Trocknungsleistungen und Trocknungszeiten sind von Standort, Lagerungsvariante, Baumart, Versuchsdesign und insbesondere vom Wetter (Klima) abhängig. Bei einer Verallgemeinerung dieser Werte ist zu beachten, dass es sich dabei um grobe Richtwerte handelt.

#### **6.5. Modellierung**

Für die Wassergehaltsabnahme von Buche, Eiche, Fichte, Hainbuche und Kiefer und die zwei Lagerungsvarianten wurden Modelle erstellt. Dabei zeigten sich für die Baumarten Eiche und Kiefer deutliche Abweichungen der Modellschätzung von der Messung. Aufgrund dieser Abweichungen sind diese Modelle als nicht brauchbar einzustufen. Die modellierte Trocknung der Baumarten Buche, Fichte und Hainbuche zeigte hingegen geringe Abweichungen von den Messwerten und plausible Verläufe. Höhere Standardabweichungen, vor allem bei Fichte, können sich durch die weite Streuung der Messwerte erklären lassen. Ein Modell kann aber nur einen mittleren Verlauf schätzen. Extreme ober- und unterhalb sind durch andere Faktoren zu erklären, die aber nicht Teil dieser Modelle waren.

## 6.6. Methodische Herausforderungen

Die Wetterdaten für den gesamten Versuch wurden von der am Freilandstandort errichteten Wetterstation bezogen. Diese wurden auf alle Standorte umgelegt. Somit konnten keine, mikroklimatisch bedingte, Unterschiede der Wetterparameter in die Modelle inkludiert werden. Es war aber im gegebenen Fall davon auszugehen, dass aufgrund der örtlichen Nähe keine großen Unterschiede hinsichtlich des Wetters zwischen den Standorten bestanden. Lediglich die Hangneigung und daraus resultierende Fallwinde könnten die Trocknung am Waldrandstandort positiv beeinflusst haben, was das, im Vergleich zum Freilandstandort, unerwartet bessere Abschneiden dieses Standorts möglicherweise erklärt. Um die standörtliche Komponente in die Untersuchung besser einbringen zu können müssten sich die Standorte in ihren Eigenschaften (Seehöhe, Klima, usw.) eindeutiger unterscheiden. Weiter müssten für jeden Standort bzw. Lagerungsvariante getrennt Wetterdaten aufgezeichnet werden. Mikroklimadaten unter der Abdeckung könnten auch Aufschluss über Trocknungsverlauf und die Gründe für das Ausmaß der Trockenmassenverluste geben. Dieser Unterschiedsmangel in den Datensätzen schränkt auch die Möglichkeiten der Modelle ein. In diesen konnte, wahrscheinlich aus obengenannten Gründen, der Standort nicht die erwartete Rolle spielen. Die Baumart allein war aber, zumindest bei Kiefer und Eiche nicht im Stande als alleiniger erklärender Faktor für den Trocknungsverlauf zu wirken. Für einen weiteren Versuch sind die Trennung nach Baumarten und Lagerungsvarianten, sowie mehrere Wiederholungen anzuraten

Für die Untersuchungen der Trockenmassenverluste müsste ein aufwändigeres und zuverlässigeres Versuchsdesign gefunden werden. Neben genauerer Messungen und detaillierterer Aufarbeitung der Proben könnte die Miteinbeziehung der Querschnittsfläche im Verhältnis zum Volumen als erklärendem Faktor zu einem brauchbaren Ergebnis führen. Natürlich würde der Aufwand der Erhebungen ein deutlich größeres Ausmaß annehmen. Ein weiteres Problem stellten die monatlichen Wiegen dar. Durch die Manipulation der Stammstücke ging schon ein Teil der Rinde verloren, was wahrscheinlich die Trocknung positiv beeinflusste. Den positiven Einfluss der Entrindung auf die Trocknungsleistung beschrieben schon HÖLDRICH et al. (2006) in ihren Untersuchungen zur Scheitholzbereitstellung. Durch eine Entrindung aller Stammstücke zu Anfang könnte dieser Effekt verringert werden und das Augenmerk auf den Trockenmassenverlust durch Zersetzung gelenkt werden. Allerdings stellt sich die Frage, wie nahe an der üblichen Praxis so ein Versuch wäre.

Im Zuge einer Trockenmassenverlusterberhebung wäre es auch empfehlenswert pathologische und entomologische Untersuchungen getrennt nach Standorten, Lagerungsvarianten und Baumarten durchzuführen. Dadurch könnte der Grund für den Trockenmassenverlust eindeutig identifiziert werden.

## **6.7. Gültigkeit**

Gültigkeit findet diese Studie nur unter ähnlichen Bedingungen wie jenen auf den untersuchten Standorten. Ein lineares Umlegen der beobachteten Effekte auf andere Materialarten und Dimensionen kann zu nicht plausiblen Ergebnissen führen.

## **6.8. Zukünftige Anwendungen**

Diese Studie, als Pilotversuch für eventuelle weitere Untersuchungen in größerem Maßstab, konnte aufzeigen, wo die Knackpunkte bei der Untersuchung der Auswirkung von Standort, Lagerungsvariante und Baumart auf das Trocknungsverhalten von Energieholz liegen. Diese Erkenntnisse können in der Planung zukünftiger Versuche Fehler vermeiden, die möglicherweise zu unzufriedenstellenden Ergebnissen, bei wesentliche höherem Aufwand als in der vorliegenden Studie, geführt hätten.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war es die Trocknung von Energieholz abhängig von Standort, Lagerungsvariante und Baumart zu quantifizieren und den Verlauf der Trocknung zu modellieren. Dazu wurde ein Versuch auf drei Standorten mit jeweils zwei Lagerungsvarianten und je Variante mit fünf Baumarten angelegt. Der Versuch wurde über zehn Monatsperioden von Februar 2014 bis Dezember 2014 geführt. Zu Beginn und Ende wurden die Trockenmassen und die Wassergehalte des Versuchs ermittelt. Am Ende jeder Monatsperiode wurde eine Wiegung zur Bestimmung der monatlichen Wassergehaltsänderung durchgeführt.

Der mittlere Startwassergehalt lag bei 44 %. In den ersten fünf Monaten, von Februar bis Juli, konnte im Mittel eine Wassergehaltsreduktion auf 22 % beobachtet werden. In den weiteren fünf Monaten Juli bis Dezember konnte eine Wassergehaltszunahme von im Mittel 1 % beobachtet werden. Der höchste Trocknungserfolg zeigte sich also in den ersten fünf Trocknungsperioden. Es konnte Wiederbefeuchtung der Stammstücke an niederschlagsreichen Tagen im Spätsommer und an Tagen mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit im Herbst beobachtet werden. Insgesamt zeigten die Nadelbaumarten Fichte und Kiefer die höchste Trocknungseffizienz, die Laubbaumarten Buche, Eiche und Hainbuche die geringere Trocknungseffizienz.

Im Mittel konnten keine signifikanten Unterschiede im Ausmaß der Trockenmassenverluste beobachtet werden. Buche zeigte den geringsten Trockenmassenverlust, gefolgt von Fichte, Eiche, Hainbuche und Kiefer.

In das Regressionsmodell für die Wassergehaltsabnahme gingen Baumart, Lagerungsvariante, Lagerungsdauer in Tagen und Periodenmittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit sowie die periodische Niederschlagsmenge ein. Plausible Modelle konnten für Buche, Fichte und Hainbuche erstellt werden. Bei Eiche und Kiefer bildeten die Modelle den Trocknungsverlauf nur ungenügend ab.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

- BRUSCHE, R. (1983): Hackschnitzel aus Schwachholz: Beregnung, Lagerung, Trocknung. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt-Kranichstein. 72 S.
- BUTIN, H. (2011): Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Diagnose-Biologie-Bekämpfung. 4. Neubearbeitete Auflage. Braunschweig.
- BUX, M. (2006): Solare Trocknung von Scheitholz. Holzenergie. Wald und Holz. Nr. 7. 30-34 s.
- DIECKHÖNER, C.; DOMNICK, C.; SCHWARTZ, M. (2014): Steigende Energiepreise-Wie anfällig ist der Mittelstand?. KFW Economic Research. Volkswirtschaft Kompakt. Nr. 56.
- DIN 52182 (1976): Prüfung von Holz. Bestimmung der Rohdichte.
- EICHLER, H. (1979): Praxis der Holz Trocknung. VEB Fachbuchverlag. Leipzig. 12-31 S.
- ERBER, G.; KANZIAN, C.; STAMPFER, K. (2015): Modelling natural drying of European beech (*Fagus sylvatica* L.) logs for energy based on meteorological data. Scandinavian Journal of Forest Research. Institute of Forest Engineering, Department of Forest and Soil Sciences, University of Natural Resources and Life Sciences. Vienna. Austria.
- HADER, F. (2005): Trocknung von Energieholz. Diplomarbeit Universität für Bodenkultur. Wien. 9 S.
- HAHN, H. (2011): Die Industrielle Revolution in Deutschland. Enzyklopädie Deutscher Geschichte Band 49. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH. 116 S.
- HARTMANN, H. (2003): Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. BMVEL, IER, Universität Stuttgart. 80 S.
- HARTMANN, H. (2007): Handbuch: Bioenergie-Kleinanlagen. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Stadtdruckerei Weidner, Rostock. Bayern. 40 S.
- HÖLDRICH, A.; HARTMANN, H.; DECKER, T. et al. (2006): Rationelle Scheitholzbereitstellung. Bericht aus dem Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe. Straubing.
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (2001): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg, New York. 320-770 S.

- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 314-324 S.
- KÖLLING, C.; GÖTTLEIN, A.; ROTHE, A. (2007): Energieholz nachhaltig nutzen. LWF aktuell Nr. 61. 32-36 S.
- KRÖLL, K. (1978): Trocknung und Trocknungsverfahren. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- MACKENSEN, J.; BAUHUS, J. (1999): The decay of coarse woody debris. National Carbon Accounting System Technical Report No. 6. Canberra. 41 S.
- MAYER-WEGELIN, H. (1955): Das Holz als Rohstoff. 2.Auflage. Carl Hanser Verlag München. Göttingen. Hamburg.
- MBV, (2015): Infoblatt: Hackguttrocknung. Biomasseverband Oberösterreich. Linz.
- NEUSSER, H.; STROBACH, D.; KRAMES, U.; SILBERNAGL, H.; SCHEDL, C. (1977b): Lagerung von Holz in Rinde, Teil 1-3; Österreichisches Holzforschungsinstitut. 40 S.
- ÖNORM CEN/TS 14774-2 (2004): Feste Biobrennstoffe. Verfahren zur Bestimmung des Wassergehaltes. Verfahren der Ofentrocknung. Teil 2: Gehalt an Gesamtwasser, Vereinfachtes Verfahren.
- ÖNORM M 7132, (1998): Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff- Begriffsbestimmung und Merkmale. ÖNORM M 7132.
- ROTHKAMM, M.; HANSEMANN, W.; BÖTTCHER, P. (2002): Lackhandbuch Holz. Leitfaden-Echterdingen: DRW-Verlag.
- SCHARDT, M. (2006): Das Problem mit der Holzfeuchte und dem Wassergehalt. LWF aktuell Nr. 54. 50-51 S.
- SCHMIDT, P.; KIRCHNER, C. (2014): Pressemitteilung. GfK Global Green Index. Einstellungen der Deutschen zu Energie- und Umweltthemen. Nürnberg: GfK SE, Corporate Communications.
- WAGENFÜHR, A.; SCHOLZ, F. (2008): Taschenbuch der Holztechnik. Fachbuchverlag. Leipzig im Carl-Hanser-Verlag. München.

**Internetquellen:**

JUNG, R. (2015): Brennwert und Heizwert verschiedener Brennstoffe. [www.bio-ethanol-kaminofen.de/heizwerte/brennwert.php](http://www.bio-ethanol-kaminofen.de/heizwerte/brennwert.php) (13.03.2015)

ÖBMV (2015): Österreichischer Biomasseverband. <http://www.biomasseverband.at/bioenergie/waerme-aus-biomasse/> (10.03.2015)

PAPST, F. (2015): <http://www.hackgut.at/biomasse-waldhackgut.php> (10.03.2015)

PASCHOTTA, R. (2015): <https://www.energie-lexikon.info/luftfeuchtigkeit.html> (18.03.2015)

## 9. ANHANG

### 9.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hygroskopische Eigenschaften von Holz in Abhängigkeit von relativer Luftfeuchte (WAGENFÜHR, 2007).....	5
Abbildung 2: Bindungsintensitäten vom Wasser im Holzkörper (verändert nach KALTSCHMITT, 2009).....	6
Abbildung 3: Einfluss der Holzfeuchte auf die Rohdichte (DIN 52182) .....	7
Abbildung 4: Heizwert von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Holzfeuchte (HARTMANN, 2007). .....	8
Abbildung 5: h-x-Diagramm nach Mollier zur Bestimmung von Temperatur, relativer Feuchtigkeit und Wassergehalt (BRUSCHE, 1983). ...	12
Abbildung 6: Freilandstandort mit Lagerungsvariante offen und geschlossen.	14
Abbildung 7: Stammscheibenentnahme für die Laboranalyse. ....	15
Abbildung 8: Verlauf der mittleren Monatstemperaturen. ....	18
Abbildung 9: Verlauf der mittleren Monatswindgeschwindigkeiten.....	19
Abbildung 10: Verlauf der mittleren relativen Monatsluftfeuchten. ....	19
Abbildung 11: Verlauf der mittleren Monatssolarstrahlungen.....	20
Abbildung 12: Verlauf der mittleren Monatsniederschläge. ....	20
Abbildung 13: Mittlere Trockenmassenverluste nach Baumarten. ....	21
Abbildung 14: Mittlere Trockenmassenverluste nach Standorten. ....	22
Abbildung 15: Mittlere Trockenmassenverluste nach Lagerungsvarianten. ....	22
Abbildung 16: Mittlere Trockenmassenverluste nach Standorten und getrennt nach Lagerungsvarianten. ....	23
Abbildung 17: Mittlere Trockenmassenverluste nach Baumarten auf den Standorten Freiland, Waldrand und Wald. ....	23
Abbildung 18: Mittlere Trockenmassenverluste nach Lagerungsvariante getrennt nach Baumart. ....	24
Abbildung 19: Trocknungsverlauf über den Versuchszeitraum nach Baumarten. ....	26
Abbildung 20: Trocknungsverlauf im Versuchszeitraum nach Standorten. ....	27
Abbildung 21: Trocknungsverlauf im Versuchszeitraum nach Lagerungsvarianten. ....	27
Abbildung 22: Kumulierte Wassergehaltsabnahme nach Baumarten. ....	30
Abbildung 23: Kumulierte Wassergehaltsabnahme gemittelt nach Standorten.	31
Abbildung 24: Kumulierte Wassergehaltsabnahme gemittelt nach Lagerungsvarianten. ....	31
Abbildung 25: Mittlere Wassergehaltsabnahme gemittelt nach Standorten getrennt nach Lagerungsvarianten. ....	32
Abbildung 26: Wassergehaltsänderungsmodelle der fünf Baumarten und deren Lagerungsvarianten.....	36

## 9.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wassergehalt in % im Splint- und Kernholz (verändert nach MAYER- WEGELIN, 1955).....	5
Tabelle 2: Darrdichten von Weichhölzern und Harthölzern (verändert nach HARTMANN, 2007).....	7
Tabelle 3: Heizwerte der Holzinhaltsstoffe (HARTMANN, 2007).....	9
Tabelle 4: Trockenmassenverlust von Stangenholz bei der Lagerung im Freien in Prozent (verändert nach HARTMANN et al., 2001).....	10
Tabelle 5: Mittlere Temperatur und mittlerer Niederschlag im Jahresvergleich (Quelle: Wetterstation Bernstein, ZAMG). ....	14
Tabelle 6: Aufnahmeperioden von Februar bis Dezember .....	16
Tabelle 7: Wassergehalts- und Trockenmassenmittelwerte zu Beginn und Ende der Aufnahmen und deren Differenzen. ....	28
Tabelle 8: Koeffizienten.....	33
Tabelle 9: Koeffizienten für Formel 5.....	34
Tabelle 10: Mittlere Abweichung der mittels Modell geschätzten Werte von den Messwerten nach Baumarten.....	37

## 9.3. Formelverzeichnis

Formel 1: Holzfeuchte (SCHARDT, 2006).....	3
Formel 2: Wassergehalt (SCHARDT, 2006).....	3
Formel 3: Heizwertberechnung für Holz (HARTMANN, 2007).....	8
Formel 4: Darrdichte.....	16
Formel 5: Funktion der Wassergehaltsänderung.....	33