



Kerngebohrtes Buchenrundholz

Analyse des Trocknungsverhaltens von kerngebohrten Buchenrundholz

Forschungsbericht

Bericht Nr.	62FE-007094-R-01-SB-01
Auftrag Nr.	R.007094-10-62FE-01
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	14. Juni 2017
Auftraggeber	Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Herr W. Riegger Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Wald 3003 Bern
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Werkstoffe und Holztechnologie Kompetenzbereich Holz- und Oberflächenbehandlung Solithurnstrasse 102, CH-2504 Biel
Verfasser	Jonas Rugenstein
Projektverantwortlicher	Thomas Volkmer
Institutsleiter	Frederic Pichelin

Abstract

Der steigende Laubholzvorrat im Schweizer Wald erfordert neue Einsatzgebiete und innovative Anwendungen speziell für die Holzarten Buche und Esche. Bei der Umsetzung der Strategie „vom Wald zum marktfähigem Bauprodukt“ müssen alle Verarbeitungsstufen in den Optimierungsprozess integriert werden. Die Entwicklung und Optimierung eines neuartigen Trocknungsverfahrens war das hauptsächliche Anliegen diese Arbeit. Dabei sollte ein dezentrales, flexibles Verfahren entwickelt werden, welches speziell auch von kleineren Betrieben angewendet werden kann. Im optimalen Fall soll die Trocknung in räumlicher Nähe zum Einschlagsort und dem späteren Nutzungsort stattfinden. Der zentrale Ansatz der Trocknung beinhaltet die Trocknung der Stämme in Form von Rundholz, stehend in einem Trocknungsturm. Die Stämme sind entsprechend der später notwendigen Länge auf Mass gekappt und kerngebohrt. Im vorliegenden Projekt wurde die Wirksamkeit und Effektivität dieses Trocknungsverfahrens geprüft. Dazu wurde eine Labortrocknung in einem herkömmlichen Frischluft-Ablufttrockner durchgeführt. Dabei konnte das Trocknungsklima gezielt gesteuert und der Trocknungsverlauf kontinuierlich überwacht werden. Parallel wurde ein Feldversuch in einem zwei-stöckigem Trocknungsturm über 6 Monate durchgeführt. Im Verlauf der Trocknung wurden folgende Parameter aufgenommen und überwacht: Feuchtverlauf und Feuchteverteilung, Feuchteprofil, Riss- und Spannungsentwicklung, Stammdurchmesser und Platzierung der Kernbohrung. Die Auswertung der Messwerte für den Trocknungsturm hat ergeben, dass die Ausrichtung im Turm keinen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit hat, dass jedoch die Stämme in der zweiten Etage im Verlauf des ersten Trocknungsabschnittes bis zum Fasersättigungsbereich schneller trocknen als in der ersten Etage. Generell

muss weiter gesagt werden, dass die Entfernung des kapillaren Wasser in jedem Fall schnell von statten ging, ca. 3 Monate. Die Trocknung unterhalb des Fasersättigungsbereichs aber sehr langsam verlief (3% in 3 Monaten), wobei hierfür die sehr kalte und feuchte Witterung im Trocknungszeitraum verantwortlich war (relative Luftfeuchte immer grösser als 80%, Aussentemperatur zwischen 10 - 0°C). Die Technische Trocknung nach dem Frischluft-Abluftverfahren wurde im Verlauf von 20 Wochen analysiert. Die kerngebohrten Proben zeigten nach Beendigung der Trocknung eine ca. 3% niedrigere Holzfeuchte als die Proben ohne Kernbohrung. Des Weiteren wurde festgestellt, dass sich bei den kerngebohrten Proben ein flacheres Feuchteprofil über den Stammquerschnitt einstellt als bei den Proben ohne Kernbohrung, weshalb davon auszugehen ist, dass die Kernbohrung auch zu einer Reduzierung der Spannungen im Trocknungsgut führt. Die Analyse des Verformungsverhaltens der getrockneten Proben hat gezeigt, dass keine wesentlichen Unterschiede zwischen den kerngebohrten und nichtkerngebohrten Proben besteht, was auch der Auswertung der Rissgrösse und -anzahl entspricht. Die Umsetzung der grundlegenden Projektidee mit dem Ziel einer stofflichen Nutzung von Buchenholz, wurde nach Beendigung und Abschluss der Trocknungsversuche weiter vorangetrieben. Das getrocknete Material der ersten Trocknungscharge wurde genutzt für die Erstellung eines kompakten Holzhauses (Ölmühle in der Nähe von Schaffhausen). Weiter läuft momentan ein weiterer Trocknungszyklus in einem drei-stöckigem Trocknungsturm (140m³ Buchenrundholz kerngebohrt). Das Material ist für zwei weitere umfangreiche Holzhausprojekte bereits verplant.

Keywords

Buche, Kernbohrung, Rundholztrocknung,

Abkürzungsverzeichnis

EDG	European Drying Group
F/A	Frischlufte / Ablufte
FSB	Fasersättigungsbereich
FSP	Fasersättigungspunkt
HF	Holzfeuchte
LF	Luftfeuchte
TG	Trocknungsgefälle

E	Elastizitätsmodul
ε	Dehnung
m_{dtr}	Masse darrtrocken
m_u	Masse feucht
l	Anfangslänge
Δl	Spannung
σ	Spannung
rm	Raummeter
u	Holzfeuchte

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Hintergrund der Arbeit	3
1.2	Zielsetzung der Arbeit	3
2	Stand des Wissens	4
2.1	Hygroskopisches Verhalten von Holz	4
2.2	Technische Trocknung von Holz	5
2.3	Trocknungsfehler	8
2.4	Trocknung der Holzart Buche	10
2.5	Trocknung von Rundhölzern	11
2.6	Kerngebohrte Rundhölzer	11
3	Material und Methoden	12
3.1	Einleitung zum experimentellen Teil	12
3.1.1	Einschnitt und Bearbeitung der Stämme	14
3.1.2	Trocknungsversuch in der Anwendung	14
3.1.3	Laborbasierte Trocknungsversuche	16
3.2	Holzfeuchtebestimmung	17
3.3	Spannungsmessung	19
3.4	Verformung über dem Wasserbecken	21
3.5	Festlegung des Trockenregimes	22
4	Ergebnisse und Diskussion	24
4.1	Trocknungsversuch in der Anwendung	24
4.1.1	Holzfeuchteanalyse	24
4.1.2	Effektivität des Trocknungsturms	26
4.2	Laborbasierter Trocknungsversuch	27
4.2.1	Holzfeuchte	27
4.2.2	Spannungen im Holz	34
4.2.3	Verformungsversuch	36
4.2.4	Weitere Trocknungsfehler	38
5	Zusammenfassung und Ausblick	39
6	Literatur	40
7	Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	41
7.1	Umfang des Berichts	41
8	Anlagen	42
8.1	Trocknungsregime	42
8.2	Ölmühle im Rohbau (bei Schaffhausen)	43
8.3	Trocknungsturm (Bibern)	44
8.4	Rissentwicklung auf Stirnseite	45

1 Einleitung

1.1 Hintergrund der Arbeit

Der Holzmarkt in der Schweiz wird sich auf die steigenden Laub- und sinkenden Nadelholzbestände, bedingt durch waldpolitische Massnahmen, einstellen müssen. So muss sich die Holzindustrie hinsichtlich der Leistungs- und Produktpalette langfristig umstellen. Vor allem aus der Buche, die den grössten Teil des Laubholzbestandes in der Schweiz ausmacht (Landesforstinventur LFI4 und LFI4a), muss respektive mehr Wert geschöpft werden. Dazu sollte die Holzart der reinen Energienutzung entzogen und stofflich genutzt werden. Die steigenden Anstrengungen, die Buche in der Holzwerkstoff- und Möbelindustrie zu etablieren, sind ein Schritt in diese Richtung. Das Holz der Buche hat aufgrund ihrer guten mechanischen Werkstoffeigenschaften das Potenzial andere Holzarten in verschiedenen Bereichen der Holzindustrie zu ersetzen. Dazu ist es allerdings erforderlich die Be- und Verarbeitungsverfahren an den Werkstoff und seine spezifischen Eigenheiten anzupassen. Einen dieser Verarbeitungsschritte stellt die Trocknung des Holzes dar.

Da die technische Trocknung von Brettholz oft mit grossen Transportwegen und einem hohen Energieaufwand einhergeht, kam die Überlegung auf, ob die Trocknung für gewisse Verwendungszwecke sinnvoller gestalten werden kann. Um in möglichst wenigen Arbeitsschritten Holzprodukte zu erzeugen, könnte das abgelängte Rundholz zuerst getrocknet werden, bevor es dem Gebrauchszweck entsprechend aufgetrennt und formatiert wird. Es könnten sowohl die höhere Ausbeute, als auch die vielseitige Verwendungsmöglichkeit für die Trocknung von Rundholz sprechen. Vor allem kleine Betriebe könnten von dieser alternative Trocknungsweise Gebrauch machen und von einem geringeren Energie- und Kostenaufwand profitieren. Die getrockneten Rundhölzer könnten direkt in örtlich zu errichtende Blockhütten verbaut werden, was lange Transportwege zu den Trocknungsanlagen ersparen würde. Das Ausgleichen von Verformungen, die während der Trocknung der Brettware entstehen, könnte bei vor dem Sägeschnitt getrockneter Brettware im Idealfall überflüssig werden.

Demgegenüber steht die lange Trocknungszeit von Rundholz, sowie die Entstehung von hohen Spannungen, welche zu Spannungsrissen führen. Diese reduzieren die Qualität und die Materialausbeute des getrockneten Holzes. Zu hohe innere Spannungen können zudem zu Verformungen und somit zu zusätzlichen Arbeitsschritten führen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Innerhalb der „Machbarkeitsstudie zur Trocknung von kerngebohrtem Buchenholz“ sollen die Feuchte und die Spannung von Buchenrundholz während und nach der Trocknung untersucht werden. Ziel ist es die Trocknungsvorteile kerngebohrter Stämme gegenüber nicht kerngebohrten Stämmen aufzuzeigen.

Um die Trocknung eines Stammes mit und ohne Kernbohrung vergleichen zu können, soll der Feuchteverlauf analysiert werden. In Abhängigkeit zur Temperatur, relativen Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und dem Durchmesser des Stammes stellt sich ein Feuchteverlauf über der Zeit ein. Dieser muss während und nach der Trocknung gemessen werden. Zusätzlich sollen die Spannungen im Holz aufgezeichnet werden. Die Feuchte- und Spannungsprofile stehen im direkten Zusammenhang zur Trocknungsqualität, und somit zum Nutzwert des Holzes. Die ermittelten Feuchten und Spannungen sollen durch die Bewertung der Rissentwicklung und Verformung, welche während der Trocknung entstehen, ergänzt werden. Durch positive Untersuchungsergebnisse, kann diese Arbeit ein grundlegender Beitrag zur Einführung einer alternativen, ökonomisch günstigen Variante der Laubholztrocknung, sein.

Zusammengefasst lassen sich folgende Ziele benennen:

- Analyse des Feuchteverlaufs während der Trocknung in Abhängigkeit der Zeit
- Erstellen von zeitabhängigen Feuchteprofilen quer zur Faserrichtung
- Analyse der Feuchteverteilung in Längsrichtung des Stammes während der Trocknung
- Ermittlung des Einflusses des Lochdurchmesser und der Probendimension auf den Trocknungsverlauf
- Analyse der Spannungen des kerngebohrten und nicht kerngebohrten Holzes
- Bewertung der Rissentwicklung und Verformung in Abhängigkeit des Trocknungsverlaufs

2 Stand des Wissens

2.1 Hygroskopisches Verhalten von Holz

Da die Holzfeuchte fast alle bedeutenden physikalischen Eigenschaften des Holzes beeinflusst, wurde das hygroskopische Verhalten des Holzes schon in diversen Arbeiten untersucht, was allerdings keine allgemein gültige Antwort aller Detailfragen zu diesem Thema hervorbrachte (Volkmer, 2003). Als kapillarporöser, hygroskopischer Werkstoff kann das Holz Wasser aufnehmen und sowohl in seinem Makro- als auch seinem Mikrosystem binden (Wagenführ & Scholz, 2012). Die Bindungsart hängt dabei stark von der gegenwärtigen Holzfeuchte ab (Volkmer, 2003). Der Wassergehalt des Holzes richtet sich wiederum nach dem Umgebungsklima und der spezifischen Anatomie und chemischen Zusammensetzung des Holzes und kann in den Sorptionsdiagrammen von Keylwerth und Noak (1964) als Gleichgewichtsfeuchte abgelesen werden. (Abb. 2.1) Sie bezeichnet ist jene Holzfeuchte, die vom Holz angenommen wird, wenn es einem konstanten Klima hinreichend lange ausgesetzt wird **Invalid source specified.**

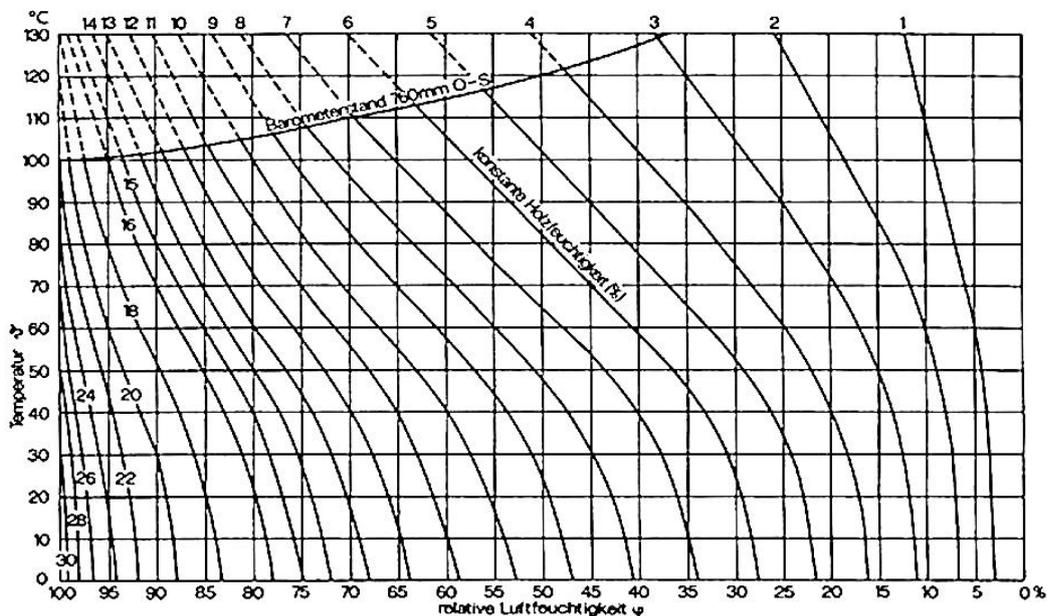


Abbildung 2.1: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur (Keylwerth, 1964)

Um das Werkstoffverhalten in Abhängigkeit der Holzfeuchte betrachten zu können, ist es notwendig die verschiedenen potentiellen Bindungsarten des Wassers bei unterschiedlichen Holzfeuchten zu kennen. Der aktuelle Wissensstand beschreibt 2 grundlegende Bindungsarten, zum einen das gebundene und zum anderen das freie, ungebundene Wasser. Das gebundene Wasser sammelt sich bis zur Fasersättigung im Mikrosystem des Holzes an. Ab dem Fasersättigungspunkt lagert sich zudem freies, ungebundenes Wasser im Makrosystem des Holzes ein, was die 2. Bindungsart beschreibt. Die maximale Wasseraufnahmefähigkeit des Holzes ist holzartenspezifisch und kann zwischen 31% Holzfeuchte (Pockholz) und 770% HF (Balsa) variieren (Niemz, 2005).

Bis zur Fasersättigung kann die Wasserbindung im Holz in 3 Arten unterteilt werden (Abb. 2.2). Deren Auftreten hängt wesentlich vom Feuchtegehalt des Holzes ab. Die Chemiesorption beschreibt eine molekulare Sorption innerhalb der Zellwand bei geringer Feuchte (bis etwa 7 % HF). Dabei lagern sich Wassermoleküle an die hydrophilen Gruppen der Cellulosen und Hemicellulosen an. Mit steigender Holzfeuchte wird das Wasser zusätzlich durch eine zweite Bindungsart im Holz eingelagert, welche als Physisorption oder auch als Adsorption bezeichnet werden kann. Diese Bindungsart beschreibt eine Wasserbindung über Van-der-Waals-Kräfte. Die Sorption des restlichen gebundenen Wassers (bis FS) wird Kapillarkondensation genannt. Hierbei wird das Wasser durch Kondensation in den Kapillaren eingelagert, da der Sättigungsdruck in den Kapillaren geringer ist als über der ebenen Oberfläche (Wagenführ & Scholz, 2012).

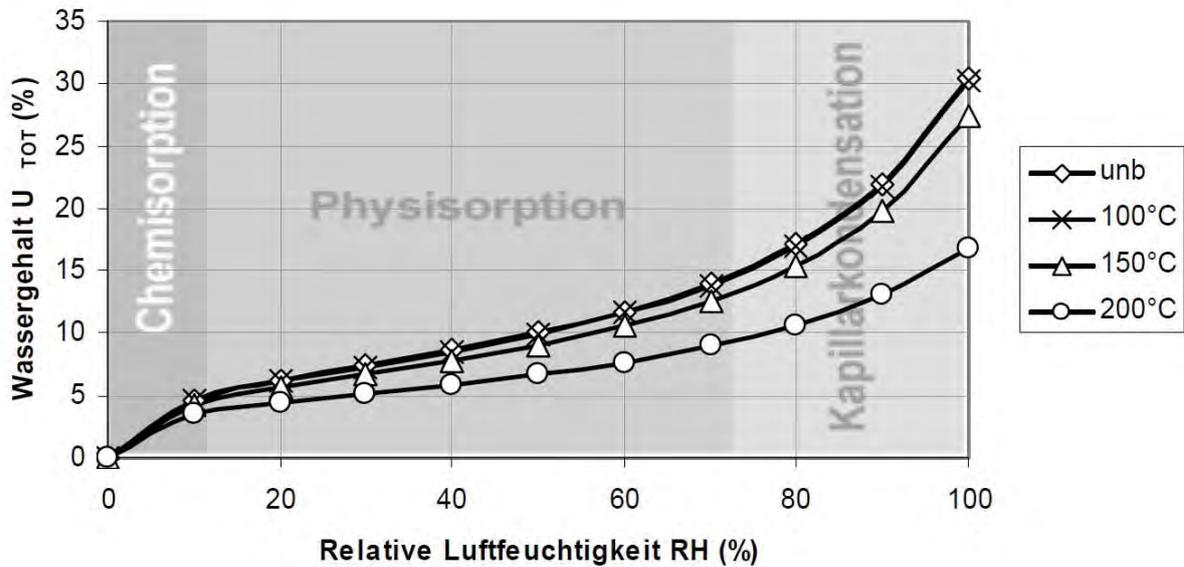


Abbildung 2.2: Sorptionsisotherme von *Pinus radiata* bei 22°C (Niemz, 2005)

Das freie ungebundene Wasser ist jenes, welches sich oberhalb der Fasersättigung in den kapillaren Räumen der Zellstruktur anlagert und durch Saugspannungen im Holz gehalten wird. Je nach Holzart kann der Wassergehalt bei grünem, also frisch geschlagenem Holz, deutlich variieren. Holz mit geringer Rohdichte, wie z.B. Balsa, ist durch seine hohe Porosität in der Lage das bis zu 8-Fache seines Reingewichts an Wasser einzulagern. Hingegen ist die Holzfeuchte jener Holzarten mit hoher Dichte (z.B. Buche oder Eiche) auf etwa 150% begrenzt (Wagenführ & Scholz, 2012). Das freie, ungebundene Wasser wird als erstes durch Verdunstung aus dem Holz herausgelöst (Brunner, 1987). Wird das Holz nach dem Einschlag heruntergetrocknet gibt es bis zum Erreichen des Fasersättigungspunktes (FSP) zwischen 35 und 22% HF freies Wasser ab. Nach gegenwärtigem Erkenntnisstand sind die Bereiche der verschiedenen Bindungsarten aber nicht starr. Es kommt zu fließenden Übergängen zwischen den einzelnen Bereichen. Daher stellt auch der Fasersättigungspunkt eher einen Übergangsbereich, als einen Punkt dar. Es wird daher von einem Fasersättigungsbereich (FSB) gesprochen.

2.2 Technische Trocknung von Holz

Ziel einer jeden Trocknung ist es das Holz auf eine, dem Einsatzzweck entsprechende Gebrauchsfeuchte zu bringen. Durch die Holz Trocknung wird zudem eine Maßhaltigkeit im Holzprodukt generiert und die Anfälligkeit gegenüber Pilzen und Verfärbung, sowie das Transportgewicht reduziert. Innerhalb der Holz Trocknung ist zwischen der natürlichen und der technischen Trocknung zu unterscheiden (Trübswetter, 2006).

Mit Hilfe feiner Sensorik kann innerhalb der technischen Trocknung die Geschwindigkeit der Holzfeuchteabnahme präzise gesteuert und somit genau auf die geforderte Einsatzfeuchte eingestellt werden. Es ist weiterhin möglich, in kurzer Zeit ein sehr homogenes Feuchteprofil einzustellen. Durch die technische Trocknung lässt sich in der Regel eine sehr hohe Qualität und somit ein hoher Wert des Holzes schaffen. Die technische Trocknung ermöglicht es diverse Trocknungsfehler durch korrekte Planung und Ausführung zu verhindern. So kann beispielsweise die Verfärbung durch Enzyme und Pilze verhindert werden, in dem das Holz kritischen Holzfeuchtebereichen, durch schnelle Trocknung nur kurze Zeit ausgesetzt wird. Die schnelle, technische Trocknung birgt allerdings stets die Gefahr, aufgrund eines falsch eingestellten Trocknungsregimes zu Fehlern im Trockengut zu führen.

Trocknungsarten der technischen Holz Trocknung

Die Art der Trocknung kann durch verschiedene Kriterien definiert werden. So werden technische Trockner beispielsweise auf Grundlage der Temperatur klassifiziert. Dabei werden Niedrig-, Normal- und Hochtemperaturtrocknung unterschieden. Eine andere Einteilung kann nach der Art der Wärmeübertragung vorgenommen werden. So unterscheidet man zwischen Konvektions- und Kontakt Trocknern (Brunner, 1987).

Für die konventionelle Trocknung größerer Mengen Holz werden in der Regel Frischluft-Abluft-Trockner (F/A-Trockner) eingesetzt. Sie sind dem Typ des Konvektionstrockners zuzuordnen, da das Holz durch überströmende Luft getrocknet wird (Abb. 2.3).

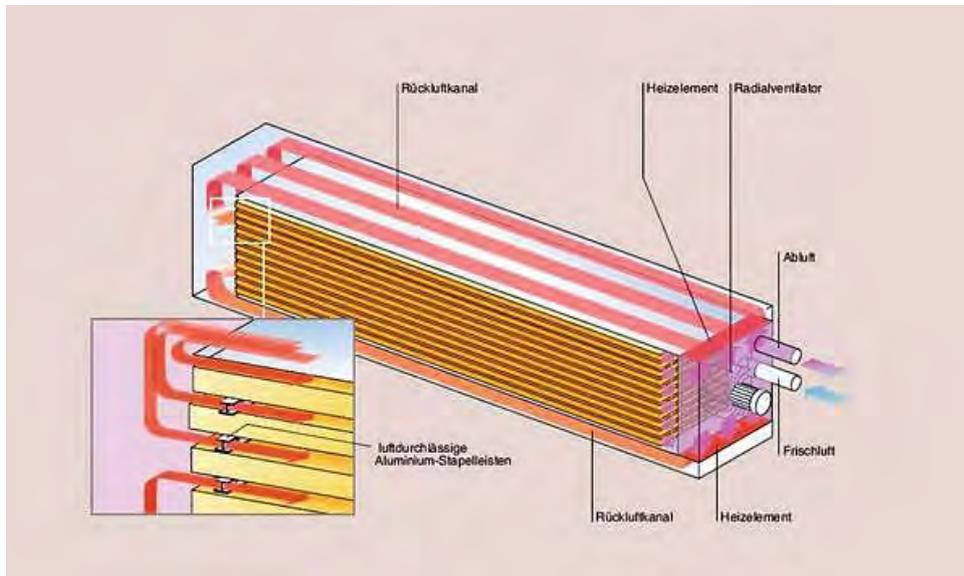


Abbildung 2.3: F/A-Trockner (Dänisch)

Die Entfeuchtung der Luft findet bei der F/A-Trocknung durch die Abfuhr der feuchten Luft und Zufuhr der frischen, trockenen Luft statt. Diese am häufigsten eingesetzte technische Trocknung zeichnet sich durch hohe Ladekapazitäten und der Möglichkeit universelle Holzgeometrien zu trocknen, aus. Ein Nachteil der F-/A-Trocknung ist sowohl der niedrige Wirkungsgrad als auch der hohe Energieaufwand, um die benötigten Temperaturen zu erreichen (Trübswetter, 2006).

Neben der F/A-Trocknung gibt es die Kondensationstrocknung. Dabei nimmt die strömende Luft wie bei der F/A-Trocknung Wasser vom Holz auf und trocknet es. Um die Luftfeuchte wieder zu senken, wird die Luft durch Wärmepumpen geleitet, in welchen sie unter den Taupunkt heruntergekühlt wird, das Wasser der feuchten Luft kondensiert und dieses im Anschluss abgeleitet werden kann.

Als weitere industriell bedeutende technische Trocknung muss die Vakuumtrocknung genannt werden. Durch einen angelegten Unterdruck sinkt die Siedetemperatur des Wassers in der luftdicht verschlossenen Kammer. Sowohl der Wassertransport im Holz als auch die Wasserabgabe des Holzes an die Luft finden schon bei niedrigeren Temperaturen statt. Dadurch können höhere Trocknungsgeschwindigkeiten gefahren werden (Wagenführ & Scholz, 2012). Die bessere Steuerbarkeit der Vakuumtrocknung garantiert eine sensiblere Trocknung und wird daher insbesondere bei schwer zu trocknenden und edlen Hölzern verwendet (Brunner, 1987).

Neben den zuvor genannten Trocknungsarten wird in der Holzindustrie noch das Hochfrequenztrocknen angewandt. Weitere Sonderverfahren existieren zwar, sind für den industriellen Masstab aber weniger relevant.

Prozess der technischen Holz Trocknung

Das Ziel der technischen Holz Trocknung ist es, das Holz schnellstmöglich, bei gleichbleibender Qualität, bis auf die gewünschte Gebrauchsfeuchte zu trocknen. Dafür muss der Trocknungsprozess auf das Trocknungsverhalten des Holzes bei unterschiedlichen Holzfeuchten angepasst werden. Ausschlaggebend für jede Trocknung ist das Trocknungsgefälle (TG), welches das Verhältnis der aktuellen Holzfeuchte zu jener Holzfeuchte beschreibt, die sich bei aktuellem Klima einstellt. Diese Feuchte wird auch Holzgleichgewichtsfeuchte oder auch als Ausgleichsfeuchte bezeichnet. Die Ausgleichsfeuchte, wie in Abb. 1 zu sehen, ist von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte abhängig. Das TG ist der Antrieb der Trocknung. Je höher das TG ist, desto schneller trocknet das Holz. Gleichermassen kann sich das Feuchteprofil im Holz schneller und extremer aufbauen (Abb. 4). Innerhalb kurzer Zeit kommt es zu hohen Feuchtedifferenzen, da die Randbereiche des Holzes sehr schnell trocknen, während die Feuchte im Inneren nur mit Verzögerung abgetragen werden kann. Sind die Feuchtedifferenzen zu hoch, kann es dazu führen, dass die Aussenbereiche durch zu hohe Zugspannungen Risse ausbilden oder es durch zu starke Austrocknung zur Unterbrechung des Feuchtetransportes kommt.

Neben dem TG ist die Belüftung des Holzes während einer Trocknung von hoher Bedeutung. Eine

schnelle Luftströmung kann die Ausbildung einer Grenzschicht über der Oberfläche verhindern, welche ansonsten als feuchte Pufferzone zwischen Kammerklima und dem überströmten Material die Trocknungsgeschwindigkeit negativ beeinflusst. Bei einer technischen Trocknung wird daher mit Hilfe von Ventilatoren die Luft auf über 3 m/s beschleunigt und somit ein turbulentes Strömungsprofil über der Materialoberfläche erzeugt (Abb. 2.4) (Brunner, 1987).

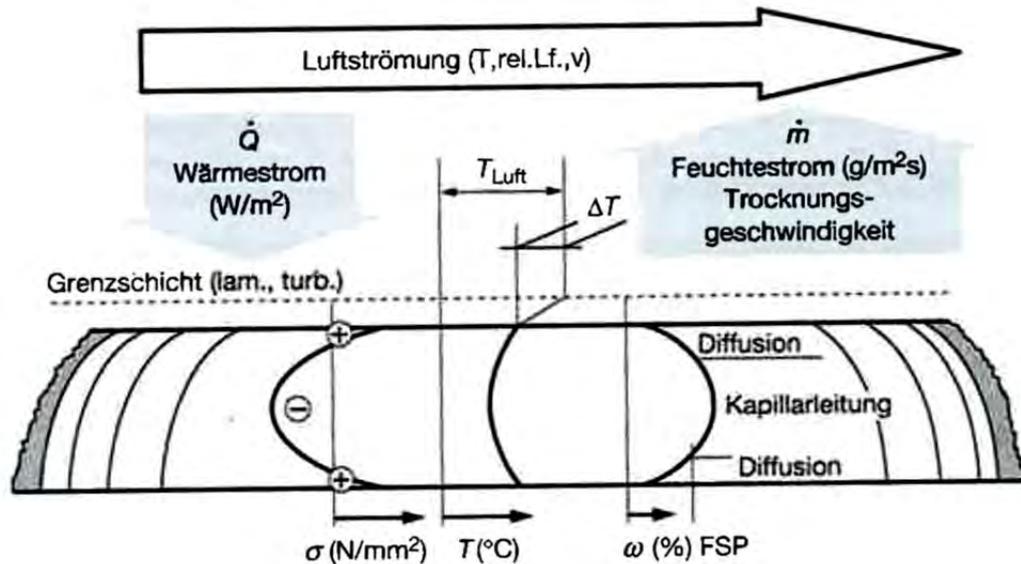


Abbildung 2.4: Darstellung des Stoff- und Wärmetransportes an der Holzoberfläche (Vanek, 1992)

Trocknungsphasen

Es ist sinnvoll die gesamte Trocknung grundlegend in eine Aufwärmphase, 2 Trocknungsphasen und eine Konditionierungsphase mit anschließendem Kühlen zu unterteilen (Abb. 5).

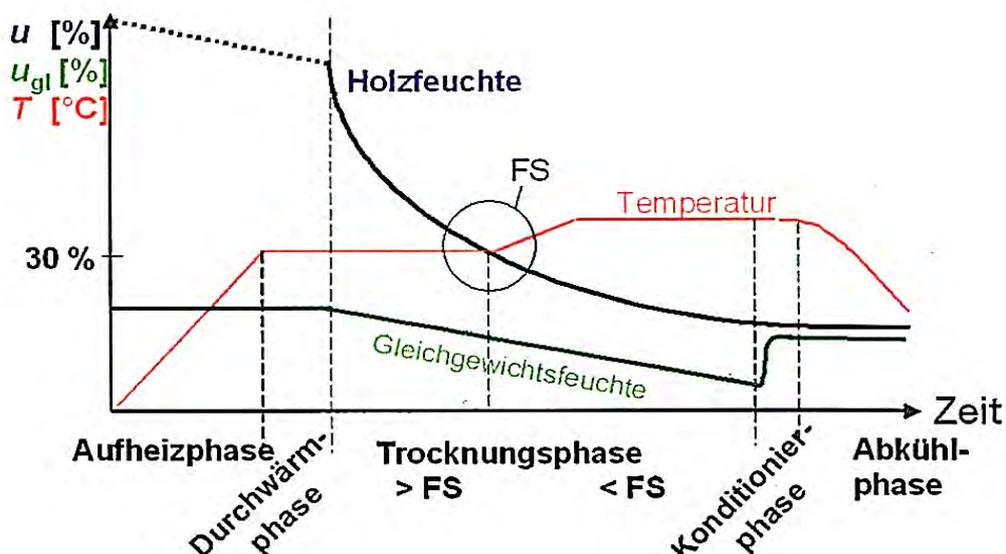


Abbildung 2.5: Darstellung des Trocknungsverlaufs (Trübswetter, 2006)

Zu Beginn der Trocknung muss das Holz langsam aufgewärmt werden. Es ist notwendig das Holz zuerst aufzuheizen und im Anschluss durchwärmen zu lassen. Ein kontrolliertes Aufwärmen stellt keine Trocknungsphase dar. Der Sinn des Aufwärmens besteht lediglich darin, über den gesamten Querschnitt des Holzes eine gleichmässige Temperatur aufzubringen, die der Temperatur während der eigentlichen Trocknung nahe kommt. Vorangegangener äusserer Verschalung, die beim Vortrocknen entstanden sein können, wird durch eine extrem hohe Luftfeuchte entgegengewirkt. Dazu wird die Luft in der Kammer durch Besprühung extrem aufgefeuchtet. Das feuchte Kammerklima garantiert zudem, dass es an der Oberfläche des Holzes nicht zur Austrocknung und zur Schädigung

des Holzes, durch z.B. Risse kommt. Sobald das Holz durchgewärmt ist, kann mit der eigentlichen Trocknung begonnen werden.

Die erste Trocknungsphase beschreibt die Trocknung bis zum FSB. In dieser Phase trocknet das Holz bei einem annähernd konstanten Klima herunter. Die Wasserabgabe des Holzes in diesem Trocknungsabschnitt findet hauptsächlich durch den Flüssigkeitsstrom des freien Wassers hin zur Oberfläche des Holzes statt. Damit dieser Prozess nicht durch zu schnelle Austrocknung der Oberfläche zum Erliegen kommt, werden im Trocknungsabschnitt 1 schonende Temperaturen gefahren und i.d.R. Sprühdüsen zugeschaltet, welche die Oberfläche befeuchten. Es ist wichtig die Feuchteunterschiede über den Holzquerschnitt möglichst gering zu halten, damit eine saubere Wasserabgabe gewährleistet ist und es nicht zum Zellkollaps kommt (Trübswetter, 2006).

Im zweiten Trocknungsabschnitt, unterhalb der Grenzfeuchte, wird die Trocknungsintensität verschärft, indem das TG erhöht wird. Es wird versucht nach Entfernen großer Mengen freien, ungebundenen Wassers die weitaus beständigeren Bindungen des Wassers im inter- und intramizellaren System des Holzes zu lösen. Schrittweise wird die Temperatur erhöht und die relative Luftfeuchte gesenkt. Dadurch wird die Ausgleichsfeuchte des aktuellen Kammerklimas weiter gesenkt. Während das in den Zellwänden und Zellhohlräumen gebundene Wasser durch Diffusion in die Aussenbereiche des Holzes transportiert wird, findet zeitgleich immer noch die Verdunstung von freiem Wasser statt (Volkmer, 2003). Der zweite Trocknungsabschnitt wird beendet, sobald die angestrebte Endfeuchte erreicht ist.

Um am Ende der Trocknungsphase 2 die Feuchtedifferenzen über den Querschnitt des Holzes auszugleichen, wird in einer Konditionierungsphase das Holz weiter klimatisiert. Das Kammerklima wird so eingestellt, dass die Gleichgewichtsfeuchte des Holzes der Zielfeuchte entspricht.

Im Anschluss kann das Holz langsam heruntergekühlt werden. Dieser Prozess sollte sensibel gesteuert werden, damit sich im Holz keine zu grossen Temperaturunterschiede aufbauen, die hohe Spannungen und somit Trockenfehler hervorrufen können.

2.3 Trocknungsfehler

Das oberste Ziel der Holztrocknung ist es neben einer präzisen Endfeuchte eine hohe und homogene Qualität des getrockneten Holzes zu erreichen. Bei der Abnahme von getrocknetem Holz wird auf folgende qualitätsmindernde Kriterien geachtet, welche in den EDG-Richtlinien zusammengefasst wurden (Welling, 1996):

- Spannungen im Holz
- Verfärbungen
- Verschalung
- Zellkollaps – eingefallene Oberfläche
- Schimmelbefall
- Abweichende Endfeuchte

Anders als die Holzqualität, zeichnet sich nach Abb. 2.6 die Trocknungsqualität das Fernbleiben von trockenungsbedingten Fehlern aus. Dabei können die Fehler durch sachgemässe Trocknungsführung vermeidbar oder aber unvermeidbar sein.

Es ist wichtig zwischen den holzspezifischen Fehlern und jenen, durch die Trocknung verursachten Holzeigenschaften oder Fehlern im Produkt zu unterscheiden. Die Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über ausgewählte Holzfehler, die während und nach der Trocknung festgestellt werden können.

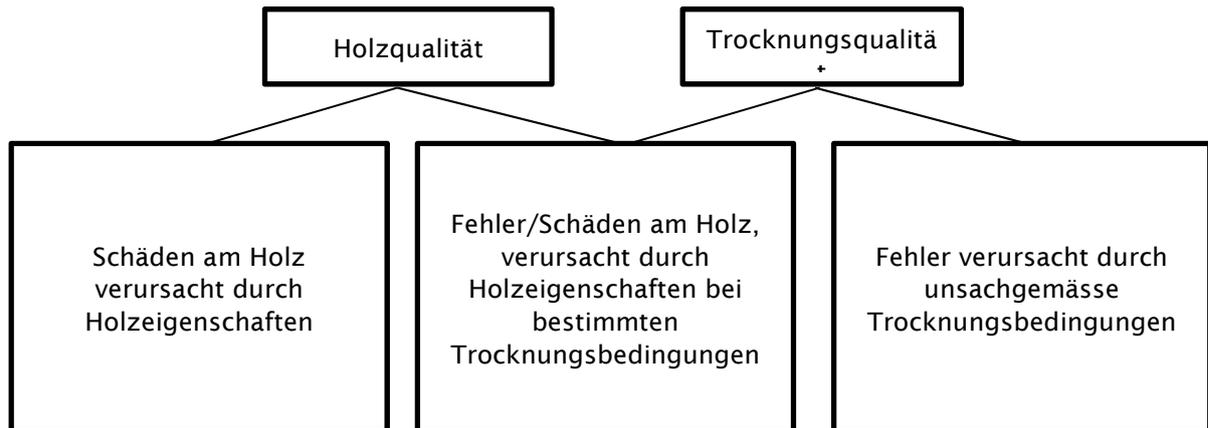


Abbildung 2.6: Abgrenzung zwischen holzspezifischen und trockenungsbedingten Schäden (Niemz, 2005)

Tabelle 2.1: Übersicht über holzspezifische Merkmale und trockenungsbedingte Eigenschaften von Schnittholz (Welling, 1996) (Niemz, 2005)

Nicht direkt beeinflusst durch Trocknung	Direkt beeinflusst durch die Trocknung
<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Eigenschaften • Rohdichte • Schwindung • Faserabweichung • Drehwuchs • Wechseldrehwuchs • Reaktionsholz • Wachstumsspannungen • Ringschäle • Harztaschen • Äste 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere Holzfeuchte • Streuung der Holzfeuchte • Verschalung • Oberflächenrisse • Innenrisse • Hirnrisse • Kollaps • Bestimmte Verwerfungen • Bestimmte Verfärbungen

Trocknungsfehler sind immer an das Trocknungsverhalten der jeweiligen Holzart, deren Anatomie und die Inhaltsstoffe, sowie an die Trocknungsart gebunden. Ein Beispiel ist die Ausprägung der inneren und äusseren Trocknungsrisse. Solche Risse können vor allem an Laubhölzern beobachtet werden, wobei die Nadelhölzer durch ihren üblicherweise geringeren Zellwandanteil masshaltiger sind und daher geringere Spannungen aufbauen, die am Ende entscheidend für die Rissbildung sind (Welling, 1996).

Es gelten nachstehende Einflussgrössen in Bezug auf Trocknungsfehler (Vermass, 2000):

- Holzart und Alter des Baumes
- Lage des Holzes im Stamm
- Dimension des Trocknungsgutes
- Einschnittmuster und Schnittrichtung
- Trocknungsbedingungen (Trocknungsklima)

2.4 Trocknung der Holzart Buche

Die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) ist ein in Europa heimischer Laubbaum und eine der 13 bekannten Buche- (*Fagus*-) Arten (Wagenführ, 2000). In der Schweiz macht der Buchenanteil 21% des gesamten Baumbestandes aus (Landesforstinventar 2002). Die Tendenz ist steigend. Das macht die Holzart Buche auch für die Holzindustrie zunehmend interessanter. Doch bei der Verarbeitung und besonders der Trocknung der Rotbuche bedarf es besonderer Kenntnisse. Die Darrdichte der Buche ist mit im Schnitt $0,7 \text{ g/cm}^3$ relativ hoch. Der hohe Zellwandanteil verleiht dem Holz ein hohes Quell- und Schwindmass, was sowohl bei der Trocknung der Buche, als auch bei deren Einsatz beachtet werden muss (Schnider, 2007).

Schon während des Wuchses entwickelt die Buche hohe Eigenspannungen, die beim lebenden Baum im Gleichgewicht stehen. Fällt man den Baum so geraten die Spannungen ins Ungleichgewicht, was zu extremen Entlastungsversuchen der Buche führen kann. Dies kann sich in Verformungen oder Rissen ausdrücken. Die inneren Spannungen können durch Drehwuchs, Krümmungen oder andere Wachstumsfehlern noch grösser ausfallen. Da diese Entspannungsrisse schon früh nach dem Einschlag auftreten können, werden die Rundhölzer meistens direkt zugeschnitten oder zumindest mit einer Entspannungsnut versehen.

Besonderheiten bei der Trocknung von Buche

Um zuvor genannte Trocknungsfehler zu vermeiden, muss bei der Buchentrocknung auf den Charakter der Holzart Rücksicht genommen werden. Es müssen einerseits die für die Buche charakteristischen Wachstumsspannungen beachtet werden, andererseits müssen die Trocknungsspannungen, welche aufgrund von Dimensionsänderung entstehen, berücksichtigt werden, da diese Dimensionsänderungen speziell bei der Buche sehr gross sind.

Die Dimensionsänderungen treten erst unterhalb der Fasersättigung auf und verhalten sich beim Holz anisotrop, also zwischen tangentialer, radialer und longitudinaler Richtung unterschiedlich stark ausgeprägt. Sie können als absolutes oder als differentielles Schwindmass angegeben werden. Letzteres beschreibt die Änderung der Dimension zu Änderung der Holzfeuchte. Die Tabelle 2.2 zeigt, dass die Buche im Vergleich zu anderen Holzarten ein sehr hohes differentielles Schwindmass besitzt. Daraus abgeleitet kommt es bei der Buche zu extremeren Quell- und Schwindbewegungen. Daher sollte ein möglichst flaches Feuchteprofil über den Holzquerschnitt das Ziel sein. Eine sensible Einstellung des TG und eine zusätzliche Befeuchtung im ersten Trocknungsabschnitt sind unerlässlich (Brunner, 1987).

Tabelle 2.2: Differentielles Schwindmass ausgewählter Holzarten (Plössl, 2008)

Holzart	Differentielles Schwindmass in % / % HF-Änderung	
	Radial	Tangential
Fichte	0.17	0.33
Eiche	0.16	0.36
Esche	0.19	0.35
Kiefer	0.17	0.33
Pappel	0.15	0.28
Rotbuche	0.21	0.41
Tanne	0.14	0.31

Eine weitere Schwierigkeit bei der Trocknung von Buchenholz zeigt sich im Erhalt der Farbqualität. Das helle Buchenholz neigt dazu sich während einer Trocknung zu verfärben. Die Verfärbungen können Oxidationsreaktionen phenolischer Inhaltsstoffe mit Sauerstoff sein oder auch aufgrund von Kondensationsreaktion von zu Monosacchariden umgebauten Hemicellulosen mit Stickstoff auftreten. Laubhölzer haben im Vergleich zu Nadelhölzern einen höheren Anteil an Hemicellulosen und sind deshalb anfälliger für diese Art der Holzverfärbung. Die Verfärbungen treten typischerweise im Temperaturbereich um 45°C auf. Eine Trocknung bei zu niedrigen Temperaturen ist deshalb zu vermeiden (Koch, Bauch, Puls, Schwab, & Welling, 2000).

Das TG sollte primär durch die Luftfeuchte gesteuert werden, da vorwiegend im Bereich zwischen 20 - 30 % LF, die Regeltemperatur in jenem Temperaturbereich stehen würde, in welchem es vermehrt zur Verfärbung des Holzes kommt.

2.5 Trocknung von Rundhölzern

Um die eingeschlagenen Holzbestände zwischenlagern zu können, werden schon seit langer Zeit Polter errichtet, in denen das Holz in luftigen Lagen gestapelt wird. Mit zunehmender Optimierung dieser Polter, durch zum Beispiel Überdachungen, haben sich Polterlager im Laufe der letzten Jahre von einer Lagermethode zu einer Art Trocknungsverfahren entwickelt (Welling, 1999). In dieser Weise werden bislang vorwiegend Nadelhölzer wie Douglasie, Fichte oder Lärche getrocknet. Das Holz wird nach dem Einschlag im Frühwinter zeitnah entrindet und gesundgeschnitten. Bei ausreichender Windzufuhr und Sonneneinstrahlung kann das Holz mit dieser Trocknungsmethode weit unter Fasersättigung gebracht werden. Die Rundholztrocknung kann bei korrektem Polterbau eine gute Holzqualität generieren und weist gegenüber der technischen Trocknung eine deutlich bessere Ökobilanz auf. Allerdings bringt diese Art der Trocknung keine einheitliche Trocknungsqualität hervor. Innerhalb der Stämme ist eine Homogenität der Feuchte sehr schwer zu erreichen. Nur mit grossem Zeitaufwand und genügend Belüftung der Stämme innerhalb der Polter ist eine derartige Trocknung sinnvoll (Ingold, 1998).

Das in dieser Weise getrocknete Holz kann nicht jedem Verwendungszweck ohne eine technische Nachtrocknung dienen. Die Holzfeuchte hängt von den zwei zentralen Grössen Luftfeuchte und Temperatur ab. Demnach ist die minimal zu erreichende Holzfeuchte durch das gegebene Klima limitiert.

Das Trocknen von Rundholz wird bislang nicht bei Laubhölzern mit grösseren Durchmessern angewandt, da es während der Trocknung zu extremen Spannungen kommt und sich diese oft in Form von grossen Rissen entspannen. Das führt dazu, dass aus Gründen der Wertschöpfung das Laubbaum-Rundholz in aller Regel zuerst aufgeteilt und anschliessend getrocknet wird.

2.6 Kernebohrte Rundhölzer

Zum ersten Mal wurden Kernbohrungen an Hölzern durchgeführt, um Rohrleitungen zu schaffen. Die ausgehöhlten Hölzer werden auch als Deichel bezeichnet und dienen dem Wasser- und Soletransport. Die ersten derartig ausgeformten Hölzer, von denen man bislang weiss, stammen aus dem 16. JH (Abb. 2.7) (Tirol News, Sept. 2016).



Abbildung 2.7: Fund eines Deichels in Tirol - verbaut etwa 1560

Kernebohrte Hölzer im Bauwesen

Kernebohrte Hölzer finden sich heute auch in verschiedenen Bereichen des Holzbaus. In Blockhäusern werden grosse Mengen Rundholz eingesetzt. Zum Teil wurden sie zuvor längs durchbohrt. Dank der Bohrung lassen sich verschiedenste Leitungen in der Holzwand unterbringen.

Unter statischen Gesichtspunkten könnten kernlose Holzbauelemente verschiedenen Einsatzzwecken dienen. Als Beispiel können biegebeanspruchte Bauteile, wie Deckenbalken genannt werden. Es ist bekannt, dass dort nur auf der Zug- oder Druckseite Normalspannungen auftreten. Die neutrale Faser

befindet sich bei symmetrischen, biegebeanspruchten Bauteilen in der Mitte. Entlang dieser muss das Bauteil im elastischen Bereich lediglich Schubspannungen aufnehmen (Abb. 2.8).

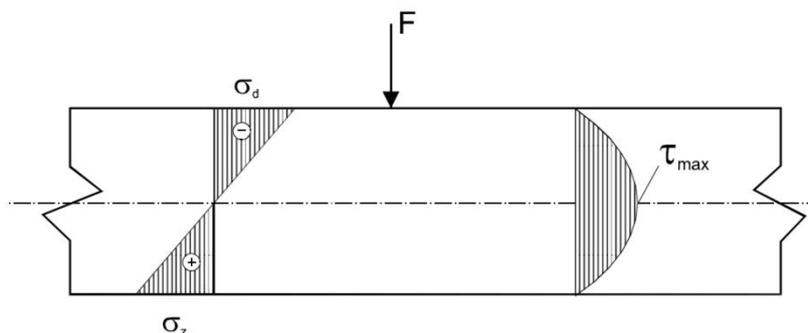


Abbildung 2.8: Normal- und Schubspannung bei Biegebelastung

Diese Tatsache hat in der Vergangenheit dazu geführt, Träger besonders auf der Ober- und Unterseite zu verstärken. So kommen T-Träger aus Stahl oder Brettschichtholz zum Einsatz. Zudem wurden Balken getestet, die aufgrund ihrer Fertigung eine Leerstelle in der Balkenmitte aufweisen, zum Beispiel der Kreuzbalken. Dieser besteht aus je vier miteinander verklebten Rundholzsegmenten und wird als Träger in Deckenkonstruktionen verbaut (Abb. 2.9).

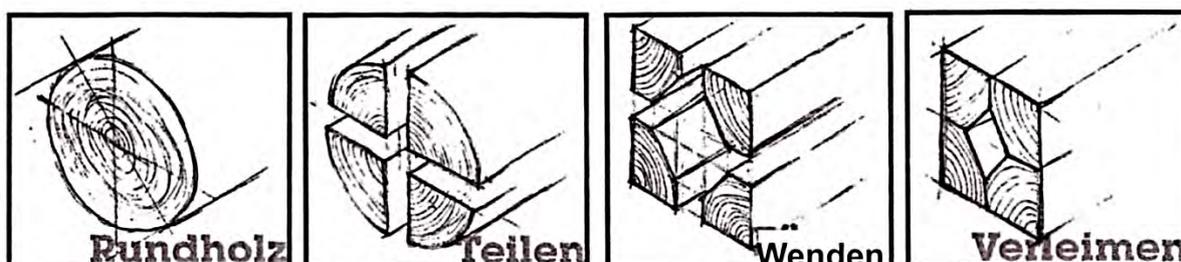


Abbildung 2.9: Herstellungsprinzip eines Kreuzbalkens (Jacob-Freitag, 2012)

Im Jahr 2008 wurde unter dem Namen "Holzbauteile aus kernfreiem Laubholz" an der ETH Zürich ein Forschungsprojekt zu den mechanischen Eigenschaften von solchen Balken durchgeführt. Im Zuge dessen, kam auch die Trocknung der Hölzer zur Sprache. Ein wesentlicher Vorteil der Kernbohrung ist laut des Berichtes die schnellere Trocknung mit weniger Spannungsrissen der Balken (Bertocchi, Frangi, & Fontana, 2009). Eine quantitative Untersuchung des Trocknungsverhaltens wurde innerhalb der Arbeit allerdings nicht durchgeführt.

Eine quantitative Untersuchung zur Trocknungsqualität stellt der Report der ESIB Biel dar. In diesem wurden Tannen-Rundhölzer mit verschiedenen Bohrungen versehen und anschliessend getrocknet. Ziel der Untersuchung war es den Einfluss der Bohrung auf die Trocknungsqualität des Holzes herauszufinden. Es wurden 60 mm und 150 mm grosse Durchmesser des Holzes ausgespart. Dem Bericht zu Folge kommt es zu 30% Zeitersparnis der gebohrten Hölzer gegenüber den massiven Vergleichsproben. Trotz der Bohrung kam es aber auch bei den gebohrten Nadelhölzern zu Spannungsrissen, die durch 3 zusätzliche Entspannungsnuten allerdings reduziert werden konnten. Die Vergrößerung der Kernbohrung wirkte sich positiv auf die Trocknungsqualität aus (Ingold, 1998).

3 Material und Methoden

3.1 Einleitung zum experimentellen Teil

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es den Einfluss der Bohrung auf das Trocknungsverhalten zu bestimmen. Dazu sollte das Buchen-Rundholz im als massives Rundholz mit dem zuvor kerngebohrten Rundholz verglichen werden. Dazu sollten die Feuchteentwicklungen im Holz, das Feuchteprofil und die Spannungen als Qualitätskriterien der Trocknung betrachtet werden. Es wurden 2 Trocknungsversuche durchgeführt (Abb. 3.1).

Die angestrebte Trocknungsvariante, in der die Stämme stehend in einem überdachten Turm natürlich trocknen, wurde als Langzeit-Grossversuch aufgebaut. In einem zweiten Versuch sollten kürzere

Stämme unter möglichst ähnlichen Bedingungen, aber deutlich beschleunigt, getrocknet werden. Der Laborversuch wurde mit Hilfe eines technischen Trockners umgesetzt.

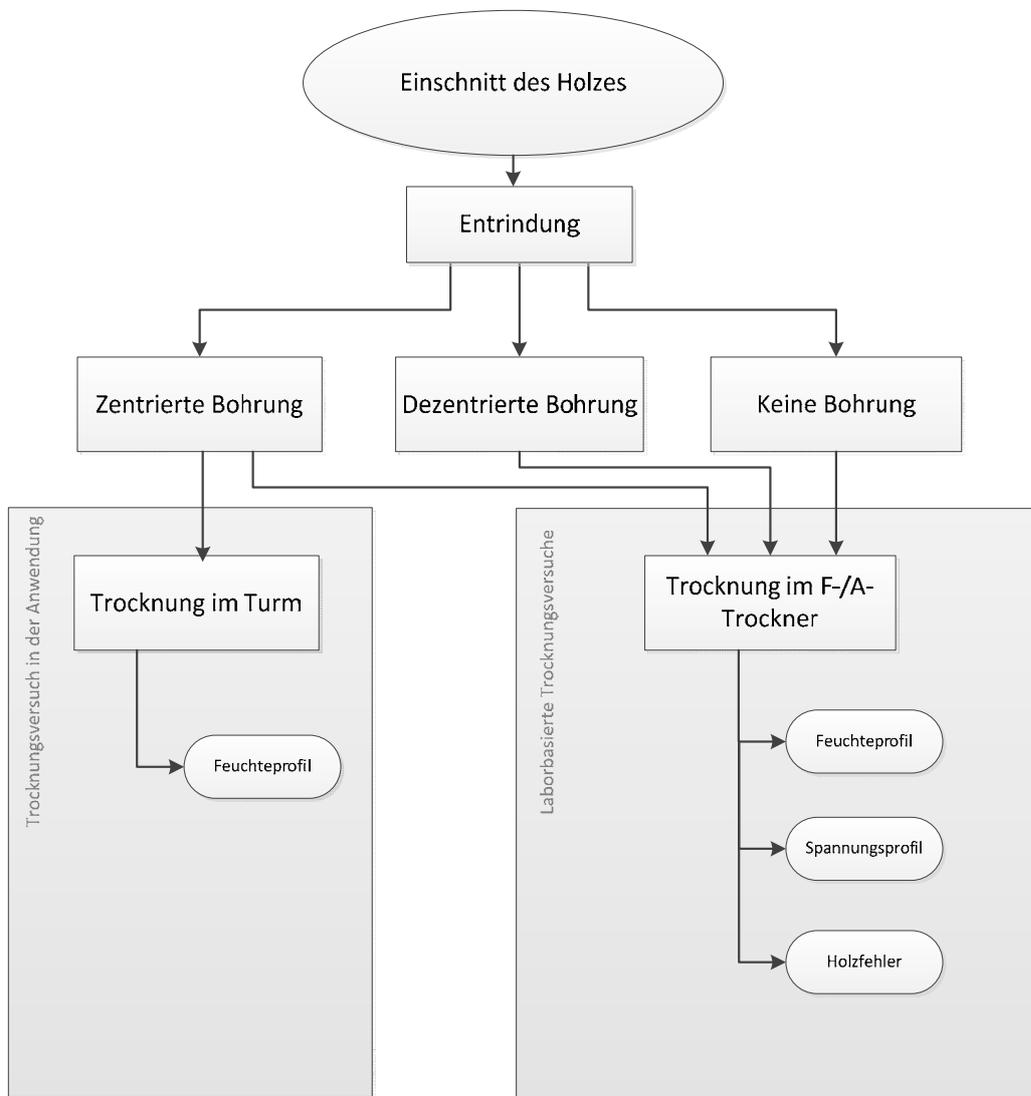


Abbildung 3.1: Versuchsplan der Trocknungsuntersuchungen

3.1.1 Einschnitt und Bearbeitung der Stämme

Für die Untersuchungen wurden vom Kanton Schaffhausen Buchenstämme zur Verfügung gestellt, welche am 25. Februar 2016 gefällt wurden. Das eingeschlagene Holz wurde einen Monat später geschält, bevor es wiederum nach einem weiteren Monat, Ende April, entsprechend des Versuchsplans für den Grossversuch und den laborbasierten Trocknungsversuch, kerngebohrt wurde (Abb. 3.2 & 3.3).



Abbildung 3.2: Eingeschlagenes und entrindetes Buchenrundholz



Abbildung 3.3: Kernbohrung der Rundhölzer für den laborbasierten Trocknungsversuch

3.1.2 Trocknungsversuch in der Anwendung

Zum Zwecke der freien, natürlichen Trocknung wurde ein Trocknungsturm mit einer quadratischen Grundfläche von $8 \times 8 \text{ m}^2$ und einer Höhe von ca. 6 Meter errichtet, in dem in 2 Etagen etwa 70 m kerngebohrtes Buche-Rundholz senkrecht aufgestellt wurde (Abb. 3.4).

Das Stammholz wurde vorab entrindet, auf 2,5 m abgelängt und mit einer 50mm starken Kernbohrung versehen. Um die Trocknung zu beschleunigen, wurde der Trocknungsturm mit einer schwarzen Kunststoffolie ummantelt, durch die das Innere des Turms bei Sonneneinstrahlung zusätzlich aufgewärmt werden sollte. Die Folie umgab dabei nur den Bereich des Turms, in dem die Stämme stehen. Die Aufbockung des Turms blieb für die notwendige Frischluftzufuhr frei. Zwischen dem Mantel und dem Dach des Turms wurde ebenfalls ein Bereich ohne Folie belassen, der es der warmen Luft ermöglichen sollte oberhalb der aufgestellten Stämme aus dem Turm zu entweichen. Der

Luftstrom wurde durch den Temperaturunterschied vom Boden bis zum Dach innerhalb des Turms generiert.

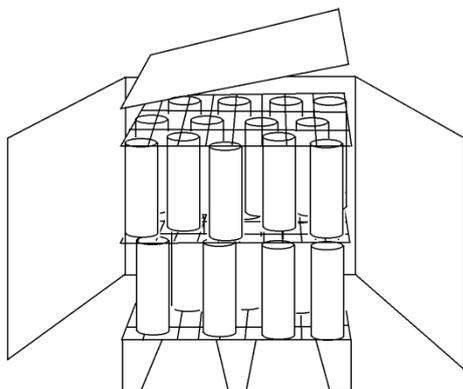


Abbildung 3.4: Trocknungsturm - Schematischer Aufbau und Umsetzung

Nach der Bestückung des Trocknungsturms Anfang Juni sollten in Abständen von 3 Monaten Feuchteproben an verschiedenen Stellen des Trocknungsturms (Vgl.Kap.3.2) genommen werden, um den Einfluss der Position auf die Trocknung im Turm zu ermitteln.

Aufgrund der Zugänglichkeit des Trocknungsturms wurde entschieden die für die Feuchteanalyse nötigen Proben auf 3 Seiten des Turmes aus den Stämmen zu entnehmen. Zusätzlich sollten Proben im Inneren des Turms entnommen werden. Um festzustellen, ob es zu einem Unterschied der Trocknungsgeschwindigkeit zwischen der oberen und der unteren Etage kommt, wurden auf beiden Ebenen Feuchtemessungen durchgeführt. Die Entnahme sollte nach Tabelle 3.1 durchgeführt werden.

Tabelle 3.1: Entnahmeplan für die Feuchtemessungen im Trocknungsturm

Entnahmeposition			Bohrkerne pro Entnahme	Entnahmemonat
Etage	Seite	Ausrichtung		
Unten	A	West	1	Juni -September - Dezember
	B	Süd	1	
	C	Ost	1	
	Mitte 1	-	1	
	Mitte 2	-	1	
Oben	A	West	1	
	B	Süd	1	
	C	Ost	1	

Analyse der Wirksamkeit des Trocknungsturms

Der Trocknungsturm wurde mit einer schwarzen Folie ummantelt, die den Turm im Sommer zusätzlich aufheizen sollte. Zudem war es die Idee, dass diese Folie im Winter die von Außen zugeführte Wärme im Turm halten würde. Damit sollte gegenüber einer reinen überdachten Freilufttrocknung, ein wärmeres und trockneres Klima im Turm geschaffen werden.

Um die tatsächliche Temperatursteigerung, bzw. Luftfeuchtesenkung durch einen derartigen Turmaufbau zu vergleichen, wurden Klimamessungen mit Hilfe von Datenloggern durchgeführt.

3.1.3 Laborbasierte Trocknungsversuche

Für die regelmässige Feuchtebestimmung während einer beschleunigten Trocknung, wurde zusätzlich zum Grossversuch ein laborbasierter Trocknungsversuch an der BFH (Standort Biel) durchgeführt. Der Versuch diente neben der Aufzeichnung des Feuchteprofils, auch der Spannungsuntersuchung und der optischen Bewertung der Stämme über die Trocknungszeit.

Für den Vergleich des Trocknungsverhaltens der Buchenrundhölzer wurden 3 wesentliche Probekörpervarianten hergestellt:

- Rundholz (\varnothing 0.3 /0.5 m) ohne Bohrung
- Rundholz (\varnothing 0.3 /0.5 m) mit zentrierter Bohrung (\varnothing 50mm)
- Rundholz (\varnothing 0.3 /0.5 m) mit dezentrierter Bohrung (\varnothing 50mm)

Wie in Abb. 3.5 dargestellt, wurden 2 unterschiedliche Stammdurchmesser gewählt, um den Einfluss der Grösse des Stammes gegenüber der Kernbohrung zu ermitteln. So ergeben sich 6 unterschiedliche Probengruppen, die jeweils an 4 Probenstücken untersucht werden.

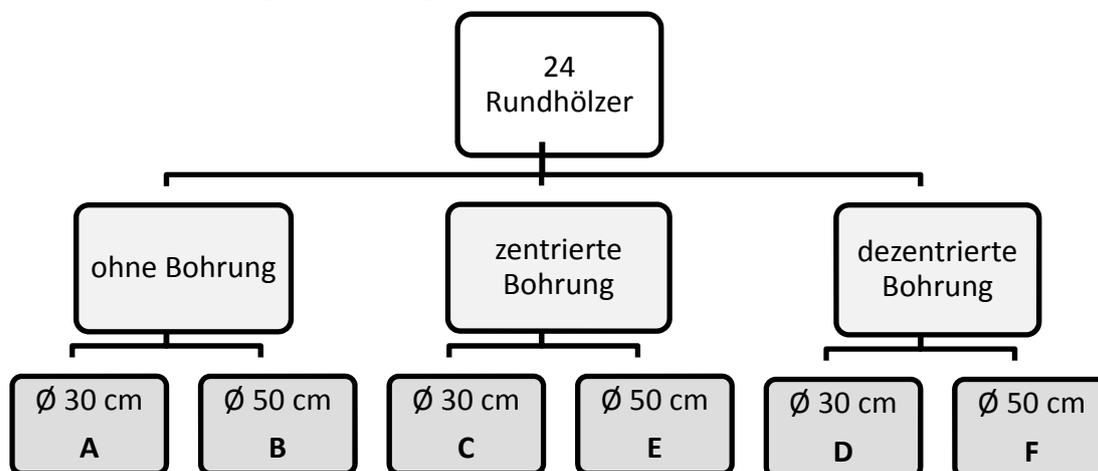


Abbildung 3.5: Probenumfang des Laborversuchs

Für den laborbasierten Trocknungsversuch wurde das Holz in einem F/A-Trockner durch eine Querstrombelüftung technisch getrocknet. Da die Stämme allerdings auch quer in der Kammer lagen, wurden sie in Faserrichtung (längs) getrocknet. Die Breite der Trockenkammer ist auf 1,10m begrenzt und bestimmt dadurch die Länge der Proben. Das Holz wurde in 2 Etagen in die Trockenkammer geführt (Abb. 3.6). Darin wurde das Holz nach einem individuell aufgestellten Trocknungsprogramm getrocknet (Vgl. Kap. 3.5). Die Holzfeuchte aller 24 Rundhölzer wurde zu Beginn der Trocknung bestimmt und in Folge alle 3 Wochen neu gemessen. Um die Untersuchungen der Rundhölzer ausserhalb der Trockenkammer durchführen zu können, musste der Trocknungsprozess für je 2 Tage unterbrochen und die Stämme aus der Trocknungskammer entnommen werden.



Abbildung 3.6: Aufreihen der Prüfstämme für die Trockenkammer

3.2 Holzfeuchtebestimmung

Für die Feuchtebestimmung wurde eine radiale Kernbohrung durchgeführt (Abb. 3.7-8). Mit Hilfe eines Zapfenbohrers (Innendurchmesser 35 mm) wurden in Zeitabständen von 3 Wochen, 2 Bohrkern gewonnen (Abb. 9). Die beiden Zapfen ergeben zusammen eine Gesamtlänge von 13.5 cm. Der Gesamtbohrkern wurde wiederum in 9 Stücke à 1.5cm aufgeteilt (Abb. 10-11). Aus den verschiedenen Feuchten dieser Stücke lässt sich ein Feuchteprofil in der radialen Richtung zum Stamm zeichnen.

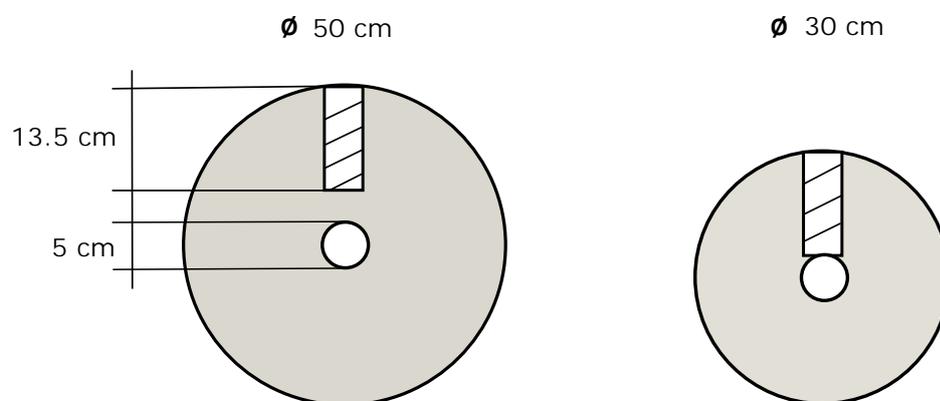


Abbildung 3.7: Bohrungen für die Feuchteermittlung an den 2 unterschiedlichen Stammdurchmessern



Abbildung 3.8: Bohrung der Kerne mittels Zapfenbohrer



Abbildung 3.9: Entnahme des Bohrkerns



Abbildung 3.10: Aufteilen der Bohrkerns in 9 Probestücke



Abbildung 3.11: Ein Probestück zur Bestimmung der Holzfeuchte

Um die Feuchte der einzelnen Abschnitte zu bestimmen, wurde die Darrmethode (DIN 52 183) angewandt. Dabei wurde die Masse der 9 Prüfkörper unmittelbar nach der Entnahme der Kerne

aufgenommen. Anschliessend wurden die Prüfkörper bei 103 °C bis zur Massekonstanz heruntergetrocknet und das Darrgewicht m_{dtr} bestimmt. Mit Hilfe Gleichung 3.1 kann die Feuchte berechnet werden:

Gleichung 3.1:

$$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \times 100 [\%]$$

u - Holzfeuchte
 m_u - Masse feucht
 m_{dtr} - Masse darrtrocken

3.3 Spannungsmessung

Ermittlung des Fasersättigungspunktes

Da die Quell- und Schwindbewegung unterhalb des FSB stattfindet, kommt es auch in diesem Bereich zur Ausbildung starker Trocknungsspannungen. Daher ist es wichtig den FSP zu kennen, ab welchem starke Dimensionsänderungen auftreten können.

Der FSP wurde mittels einer Auffeuchtung von 20 Holzproben der zu untersuchenden Buchenstämmen in einem Exsikkator (20°C / 100% rel. LF) ermittelt (Abb. 3.12-13). Es wurden in regelmässigen Zeitabständen das Gewicht und die Dimensionen der Proben bestimmt. Sobald innerhalb von 24 h keine Dimensionsänderungen mehr zu messen waren, wurde die zu diesem Zeitpunkt bestimmte Masse für Berechnung der Holzfeuchte verwendet.



Abbildung 3.12: Holzwürfel zur Bestimmung des FSP Abbildung 3.13: Exsikkator zur Befeuchtung (20°C / 100% rel. LF)

Spannungsermittlung über die Rissbreitemessung im Stirnholz

Der Vergleich der Spannung in den einzelnen Probestücken wurde in einem ersten Schritt durch die Betrachtung der spannungsbasierten Rissbildung an den Stirnseiten der Rundhölzer vorgenommen. Es wurden bei jeder Holzentnahme aus der Trocknungskammer, die Risse optisch dokumentiert und die Breite der Risse ab dem Beginn des FSB vermessen. Dazu wurden in einem Abstand von etwa 30 mm zum Stammumfang alle Risse mit einer Breite von mehr als 4 mm aufgenommen (Abb. 3.14). Ein Teil der Stämme war mit einer Entspannungsnut versehen. Bei solchen Stämmen wurden generell 15 mm von der Summe aller Rissbreiten abgezogen.



Abbildung 14: Rissbreitemessung

Analytische Spannungsermittlung

Nach Unterschreiten des FSP wurden Spannungsmessungen durchgeführt. Dazu wurde in Anlehnung an die Spannungsmessung von *Archer* ein Probestück aus einer Scheibe Holz geschnitten und anschliessend horizontal zu Leisten aufgetrennt. Mittels der Längenänderung der einzelnen Leisten, lässt sich die Spannung quantitativ bestimmen und zwischen den Hölzern vergleichen (Abb. 3.15)

(Archer, 1987).

Die Abmasse der Holzprobe waren 100 x 40 x 10 mm, wobei von diesen wiederum etwa 2 mm breite Leisten abgetrennt wurden.

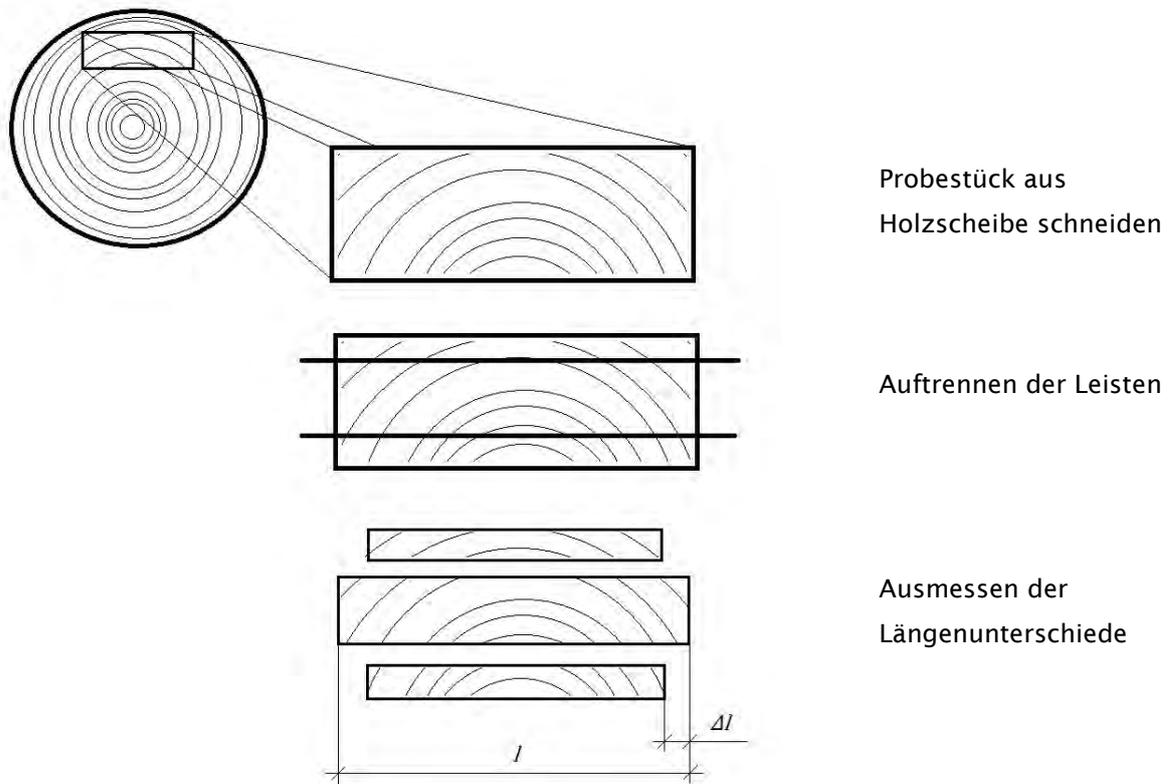


Abbildung 3.15: Spannungsermittlung durch Längenänderung von Holzleisten

Um die Spannung nach der Gleichung 3.2 zu ermitteln, bedarf es der Dehnung und dem feuchteabhängigen E-Modul des Holzes.

Gleichung 3.2:

$\sigma = \varepsilon \times E$	E - Elastizitätsmodul ε - Dehnung σ - Spannung
---------------------------------	-------------------------------------------------------------------------

Die Dehnung beschreibt die Längenänderung bezogen auf die ursprüngliche Länge. (Gleichung 3.3)
 Die beim Auftrennen des Holzstücks entstandenen Leisten werden zur Bestimmung der Anfangslänge vorab vermessen. Durch die Spannungen im Holz kommt es unmittelbar nach dem Auftrennen zu einer Längenänderung der Leisten. Diese lässt sich mit Hilfe eines Messschiebers bestimmen.

Gleichung 3.3:

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$	ε - Dehnung l - Anfangslänge Δl - Spannung
------------------------------------	------------------------------------------------------------------------

3.4 Verformung über dem Wasserbecken

Am Ende der Trocknung sollten abschliessend die Verformungen des Holzes untersucht werden. Dabei sollten die Verformungen von, aus dem Rundholz geschnittenen, Bohlen nach deren Aufweichung verglichen werden.

Hierzu wurden 5 cm starke Mittelbretter mit Hilfe einer Bandsäge aus den Stämmen herausgeschnitten (Abb. 3.16).



Abbildung 3.13: Zuschnitt der Bohlen mittels Bandsäge

Die zugeschnittenen Bohlen wurden für 4 Wochen im überdachten Außenbereich gelagert. Anschliessend wurde je eine Bohle pro Variante der 30 cm dicken Stämme und je 2 Bohlen pro Variante der 50 cm dicken Stämme für den Versuch ausgewählt. Bei der Auswahl der Bohlen wurde darauf geachtet, dass die Proben möglichst wenige Risse und alle Proben eine vergleichbare Jahrringlage hatten. Die ausgewählten Prüfstücke wurden anschliessend einseitig plan gehobelt, um eine Referenzfläche für spätere Messungen zu schaffen. Im Anschluss wurden die Bohlen in Breite und Länge so eingeschnitten, dass die Prüfkörper auf die Prüfvorrichtung passten. Mit dem Ablängen des Holzes wurden gleichzeitig jene Stücke nahe am Hirnholz abgetrennt, die am stärksten von Rissen durchzogen waren. Dieser Prüfvorrichtung (350 mm x 980 mm) bestand aus 2 hintereinander liegenden Kunststoff-Wannen, über die ein Gerüst gezogen wurde, welche die Holzbohlen für 2 Wochen tragen sollte. Dabei war es das Ziel die Proben durch den entstehenden Wasserdampf unterhalb des Holzes aufzufeuchten (Abb. 3.17).



Abbildung 3.14: Die Prüfvorrichtung

Die Wannen wurden dazu mit entmaterialisiertem Wasser befüllt, bevor die Prüfkörper aufgebracht und durch Holzelemente abgedichtet wurden. Damit sich unterhalb der Probe eine möglichst hohe Luftfeuchte aufbauen konnte, wurden zusätzlich sämtliche Bohrungslöcher und durchgehende Risse mit Tape verklebt (Abb. 3.18).



Abbildung 3.15: Abgedichtete Prüfvorrichtung

Durch die Aufweuchtung sollte sich der Prüfkörper über dem Wasserbecken verformen. Dabei entscheiden im Wesentlichen die Jahrringlage und die restlichen vorhandenen Spannungen über die Verformungserscheinungen. Die hervorgerufenen Verformungen der Prüfkörper konnten anschließend an allen 4 Ecken des Prüfkörpers, sowie je an einer Messstelle an halber Kantenlänge (lange Kante) gemessen werden. Dazu wurde der Prüfkörper auf eine plane Fläche gelegt und der durch Verformung entstandene Luftspalt zwischen der Probenunterseite und der planen Fläche mit Hilfe eines Messschiebers aufgenommen (Abb. 3.19).

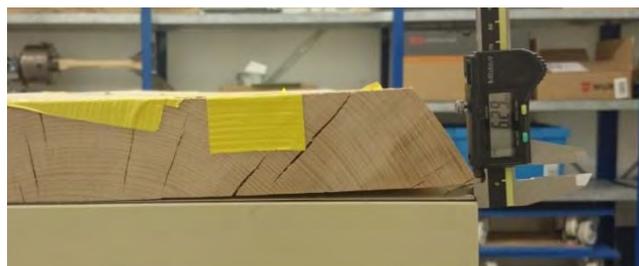
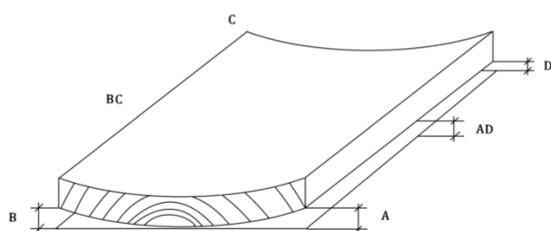


Abbildung 3.16: Messungen der Verformung über 6 Messstellen (links) mittels Messschieber (rechts)

3.5 Festlegung des Trockenregimes

Die Trocknung muss optimal auf das zu trocknende Holz abgestimmt sein. Dabei müssen die relative Luftfeuchte und die Temperatur so eingestellt sein, dass die Trocknung möglichst schnell stattfindet, ohne die Qualität des Holzes zu gefährden. Die Einstellung der Parameter während des Trocknungsverlaufes hängt von der aktuellen Holzfeuchte, der Form und Grösse des Trocknungsgutes, sowie von der Holzart ab.

Wie zuvor erwähnt, muss das Holz zuerst bei hoher Luftfeuchte aufgewärmt werden, bevor die eigentliche Trocknung beginnt. Danach ist es wichtig weiterhin sicherzustellen, dass die Trocknung nicht zu scharf ist, also das Trocknungsgefälle nicht zu hoch gewählt wird. Ist das Trocknungsgefälle falsch gewählt, kann es zur Austrocknung der Randbereiche und in Folge zu Holzfehlern, wie Rissen, kommen. Die Trocknung sollte in einem 2. Trocknungsabschnitt ab Erreichen des FSP verschärft werden, da nun keine Gefahr der Qualitätsminderung mehr durch Zellkollaps besteht. Der Trocknungsverlauf ist in Abb. 3.20 dargestellt. Die eingestellten Parameter des Trockenregimes sind Anlage 7.1 zu entnehmen.

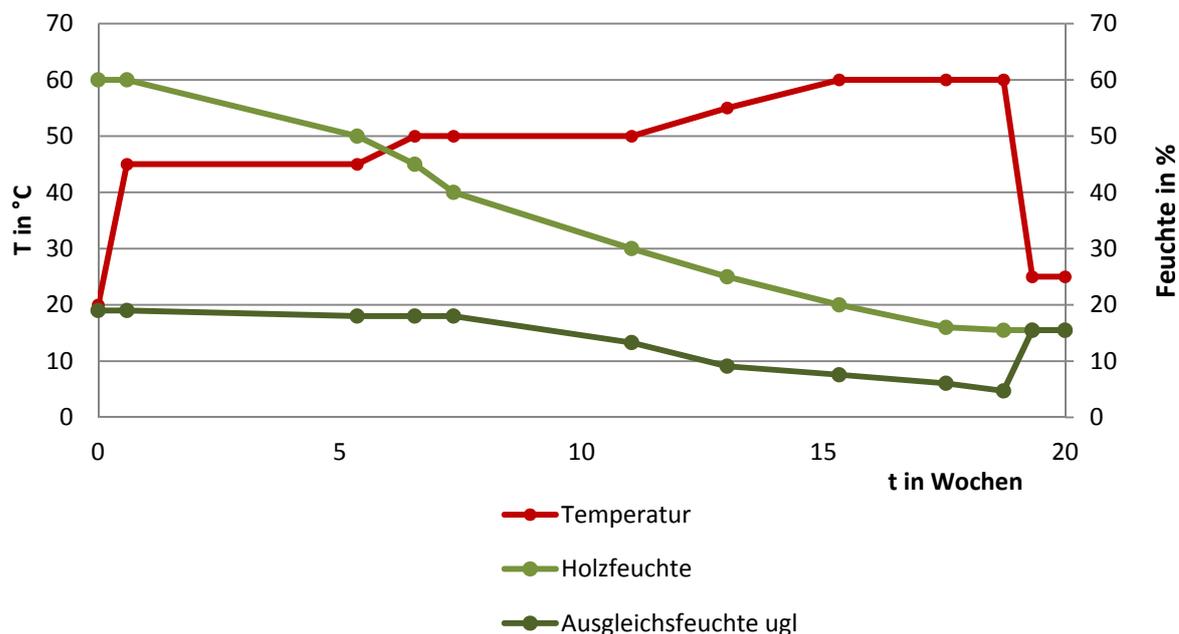


Abbildung 3.20: Trocknungsablauf der Buchenrundholztrocknung

Für den grossen Durchmesser des zu trocknenden Buche-Rundholzes waren eine lange Aufwärmphase und eine langsame Trocknung notwendig, so dass das Holz über den gesamten Querschnitt möglichst gleichmässig an Feuchte verlieren konnte. Die Buche neigt zu Trocknungsfehlern, weshalb eine sanfte Einstellung der Trocknungsparameter erforderlich war. Das Trocknungsgefälle wurde durch zusätzliche Befeuchtung auf 2.0 eingestellt. Die Temperaturen im ersten Trocknungsabschnitt bewegten sich um 50°C bei hohen relativen Luftfeuchten. Die Trocknung wurde nach Erreichen des FSP (ca. 30 % HF) geringfügig verschärft. Das maximale Trocknungsgefälle im 2. Trocknungsabschnitt wurde bei 3,4 gesetzt und die Temperatur auf 60°C gesteigert. Zum Ende der Trocknung wurde eine Konditionierungsphase von einer halben Woche eingeplant, in der die Lufttemperatur wieder erhöht und die Temperatur gesenkt wurde. Damit stieg die zuvor sehr niedrige Ausgleichsfeuchte bis zum Wert der zu diesem Zeitpunkt im Holz ermittelten Holzfeuchte an. Dies entspricht einem Trocknungsgefälle von 1. Nach dem Abkühlen konnte das Holz aus der Trocknungskammer entnommen werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Trocknungsversuch in der Anwendung

4.1.1 Holzfeuchteanalyse

Die an den, im Trocknungsturm entnommenen, Bohrkernen durchgeführte Feuchteanalyse zeigt einen typischen Trocknungsverlauf über der Zeit. Dabei sank die Holzfeuchte aller Stämme bis zum Erreichen des FSB schnell. Über Fasersättigung konnte das flüssige Wasser recht schnell und in großen Mengen durch Kapillarkräfte zur Oberfläche des Holzes transportiert werden und dort verdunsten. Das erklärt die starke Holzfeuchteabnahme in diesem Bereich. So war die durchschnittliche Holzfeuchte innerhalb der ersten 3 Monate (Juni bis September) von etwa 44 % auf 32,5 % gesunken. Dieser raschen Feuchteabnahme folgte in den anschließenden 3 Monaten bis Ende Dezember allerdings eine sehr langsame Trocknung. Da unter Fasersättigung die nächsten zu erreichenden Wassermoleküle durch Kapillarkondensation gebunden waren, dauerte es wesentlich länger das Holz zu entfeuchten. So sanken die Holzfeuchten von September bis Dezember im Schnitt nur um knapp 3 %. (Tabelle 4.1)

Tabelle 4.1: Durchschnittliche Holzfeuchte des Bohrkerns in Abhängigkeit der Zeit; Entnahme an verschiedenen Stellen im Trocknungsturm

Probenreihe	Etage	durchschnittliche Holzfeuchte u [%]		
		26.06.2016 Juni	27.09.2016 September	21.12.2016 Dezember
A	unten	41.52	33.00	32.07
A	oben	42.01	29.41	28.41
B	unten	47.69	34.28	33.45
B	oben	45.54	29.30	29.49
C	unten	44.92	33.63	28.34
C	oben	42.85	28.12	23.26
M	unten	44.58	36.10	31.20
M	unten	43.21	35.85	32.11
Durchschnittliche HF [%]		44.04	32.46	29.79

Der Feuchteverlauf über der Trocknungszeit lässt erkennen, dass die Holzfeuchte in der oberen Ebene des Turms schneller sank als in der unteren. So wiesen die Stämme in der oberen Etage des Turms nach 3 Monaten der Trocknung eine Holzfeuchte von etwa 30 % auf, wohingegen die Stämme auf der unteren bei etwa 35 % lagen. (Abb. 4.1-2) Des Weiteren fällt auf, dass die die Stämme in der Mitte des Trocknungsturms in den ersten 3 Monaten der Trocknung weniger Feuchte abgaben als solche Stämme, die am Rand des Turms standen. Hingegen sanken die Holzfeuchten mittig gelagerter Stämme in den Herbstmonaten (ab September) vergleichsweise schnell, so dass sich für die Stämme in der Turmmitte eine fast lineare Feuchteabnahme über den Versuchszeitraum ergab. Durch diese konstante Feuchteabnahme erreichten die Stämme in der Turmmitte nach 6 Monaten Trocknung im Schnitt die gleiche Endfeuchte wie die Stämme im Außenbereich.

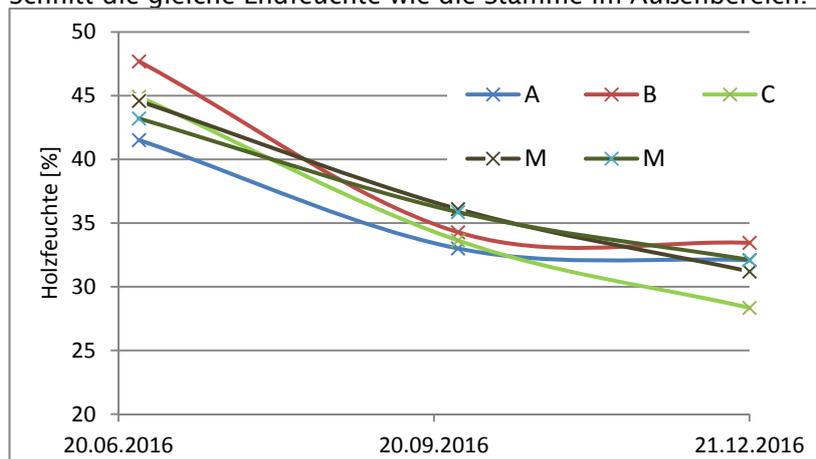


Abbildung 4.1: Entwicklung der durchschnittlichen Holzfeuchte des Trocknungsturms über der Zeit - Untere Etage

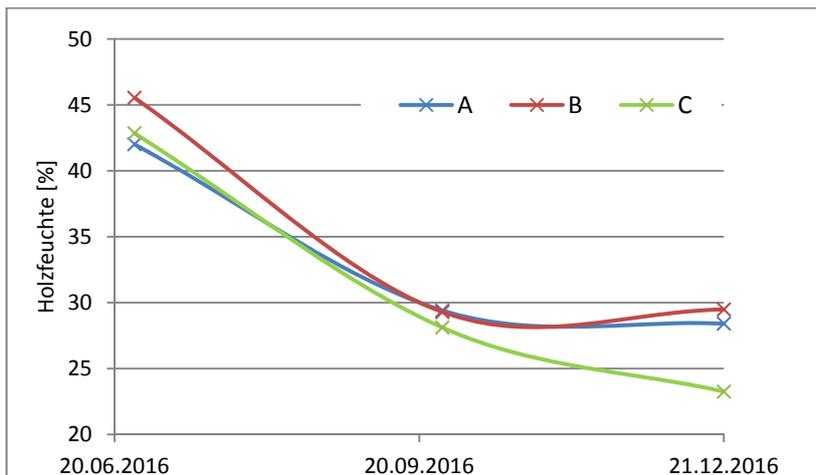
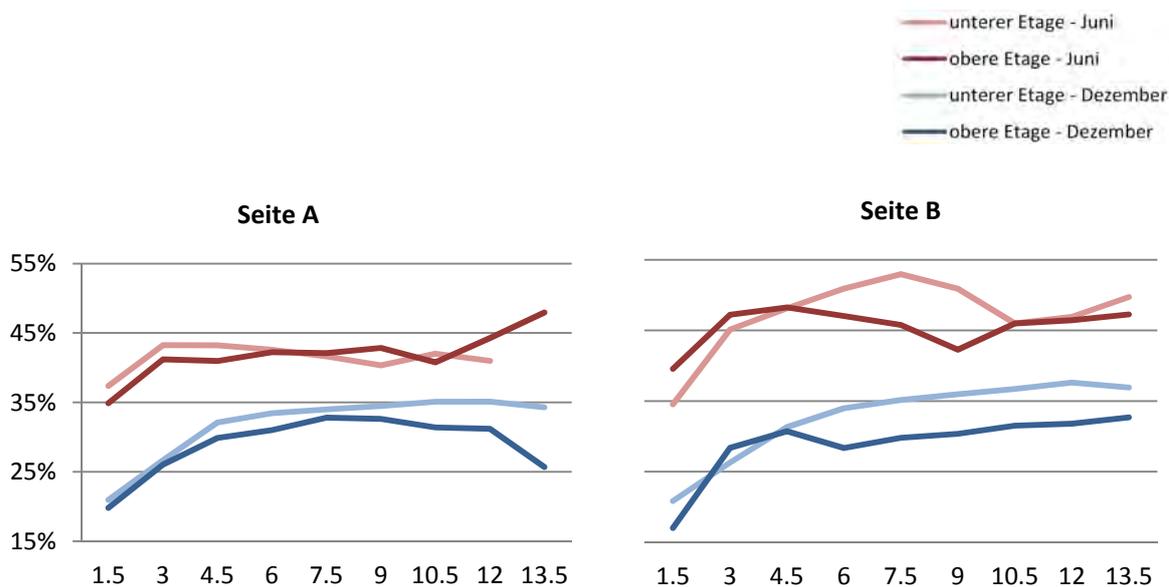


Abbildung 4.2: Entwicklung der durchschnittlichen Holzfeuchte des Trocknungsturms über der Zeit - Obere Etage

Betrachtet man die Feuchteprofile, die sich in Abhängigkeit des Stammradius ergeben, fällt auf, dass das Holz im Außenbereich deutlich trockener ist als im Rest des Stammes. (Abb. 4.3) Die Holzfeuchte steigt innerhalb der ersten Zentimeter hinter der Mantelfläche des Stammes deutlich an und erreicht ihr Maximum bei etwa 7.5 bis 9 cm. Ab dieser Tiefe bis zur gewählten maximalen Bohrtiefe von 13.5 cm stellte sich eine annähernd konstante Holzfeuchte ein. Da die analysierten Stämme auf der Westseite (Seite C) einen kleineren Durchmesser hatten, wurde die Kernbohrung durch die Bohrkernentnahme schon erreicht. Aus diesem Grund sinkt der Feuchteverlauf auf den letzten Zentimetern ab. Vergleicht man die aufgenommenen Feuchteprofile der Stämme zwischen der ersten Messung im Juni und der letzten Messung im Dezember, zeigt sich, dass die Holzfeuchte über den ganzen Stammquerschnitt sehr gleichmäßig abnahm. Eine Vergrößerung des Feuchtegradienten, also des Anstiegs der Feuchte in radialer Richtung, ist nicht erkennbar.



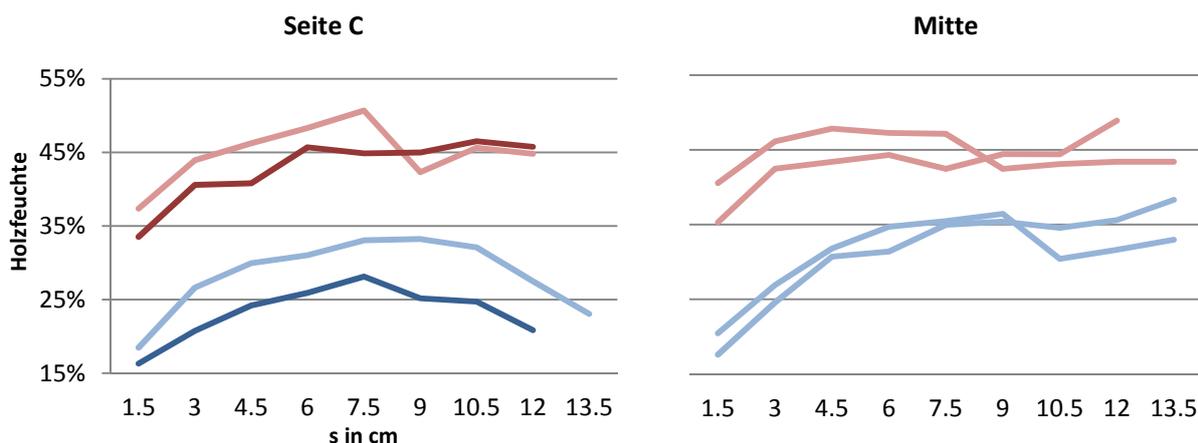


Abbildung 4.3: Vergleich der Feuchteprofile in Abhängigkeit der Bohrtiefe

Die an verschiedenen Seiten im Außenbereich des Turms platzierten Proben zeigen in ihren Feuchtwerten keinen Unterschied. Somit lässt sich kein Einfluss der Seite (West-/Süd-/Ostseite) auf die Trocknungsgeschwindigkeit erkennen.

4.1.2 Effektivität des Trocknungsturms

Klima im Trocknungsturm

Die Klimawerte im Trocknungsturm wurden über Datenlogger aufgenommen, die Klimawerte außerhalb des Turms wurden hingegen vom Bundesamt für Meteorologie Meteo Schweiz bezogen. (Abb. 4.4)

Der Klimawerte wurden über 6 Monate aufgenommen. Ab November wurde zusätzlich Wärme von einer externen Holzsznittelheizung in den Turm eingebracht.

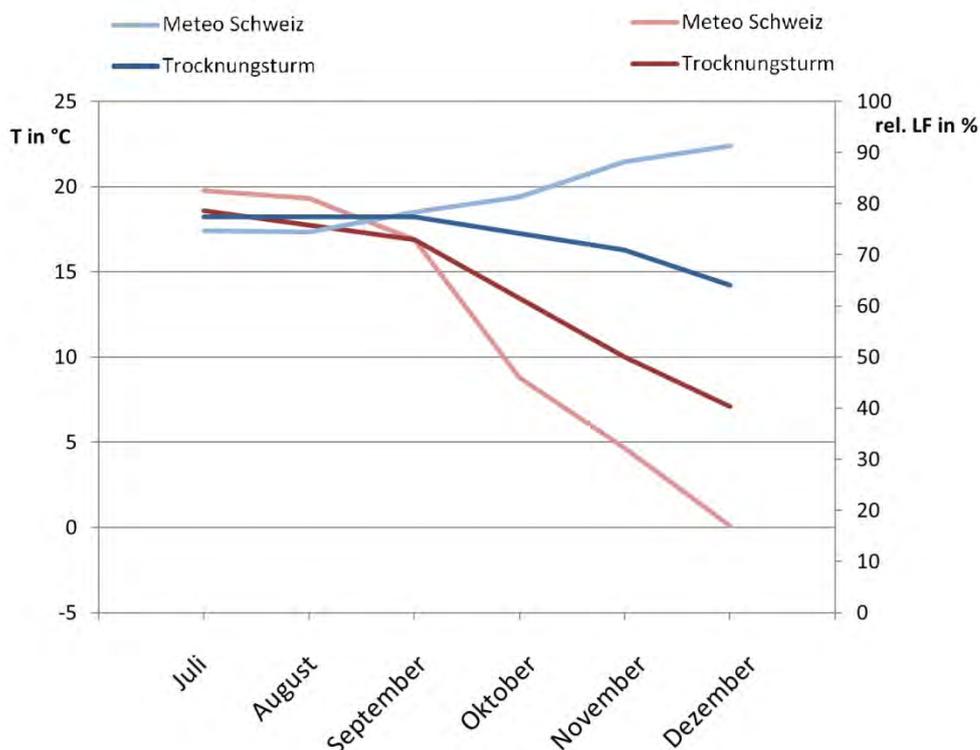


Abbildung 4.4: Temperatur- und Feuchteverlauf innerhalb (Trocknungsturm) und außerhalb (Meteo Schweiz) der Trocknungseinrichtung; Schaffhausen (CH)

Erkennbar ist, dass die Luft im Trocknungsturm während des Sommers keine veränderten Temperatur- oder Feuchtigkeitswerte gegenüber der Luft ausserhalb des Turms aufweist. Ab Beginn des Herbstes (September/Oktober) fällt die Temperatur außerhalb des Turmes aber schneller und die

relative Luftfeuchtigkeit steigt. Demgegenüber kommt es im Inneren des Turms zu einem langsameren Temperaturabfall, und da die absolute Luftfeuchte im Außenbereich stark sinkt, kommt es zu einem Absinken der relativen Luftfeuchte im Trocknungsturm. Nachdem eine externe Wärmequelle zugeschaltet wurde, fällt die Temperatur im Turm weniger stark und die relative Luftfeuchte sinkt stärker. So wird selbst im Dezember noch ein Klima von 7.1°C und 64 % rel. LF erreicht, was bezogen auf die, zu diesem Zeitpunkt vorhandene Holzfeuchte von 29 % ein Trocknungsgefälle von 2.2 hervorruft. Demgegenüber würde das Umgebungsklima von 0.1°C und 91.3 % rel. LF das Holz nur mit einem Trocknungsgefälle von 1.2 trocknen.

Energiebedarf

Für die verbrauchte Menge Hackschnitzel wurde eine Heizwertberechnung durchgeführt. Es ergab sich, dass die genutzten 30 m³ Schüttware Buchenhackschnitzel (20 % Holzfeuchte) eine Energie von etwa 14 MWh freigaben. Bei einem, für die Industrie üblichen Strompreis von 0.15 SFr (nach Angaben des Bundesamtes für Energie), würde der Erwerb der eingesetzten Energiemenge 2052 SFr kosten.

4.2 Laborbasierter Trocknungsversuch

4.2.1 Holzfeuchte

Durch die regelmässige Messung der Holzfeuchte ist es möglich die Trocknungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Rundhölzer zu vergleichen.

Feuchteverlauf über der Zeit

Nach 20 Wochen technischer Trocknung ist die ermittelte Holzfeuchte im Durchschnitt niedriger als durch die Messsensoren während der Trocknung angezeigt. Die anfänglichen Feuchteunterschiede zwischen den einzelnen Probekörpern wurden innerhalb der ersten 5 Wochen der Trocknung bis zum Fasersättigungsbereich weitestgehend ausgeglichen. Die anschliessende Trocknung konnte dem Holz weiterhin grosse Mengen Wasser entziehen. Aufgrund des ansteigenden Trocknungsgefälles im Verlaufe der Trocknung, wird die Trocknungsgeschwindigkeit etwa konstant gehalten. Es stellt sich, wie in Tab. 4.2 zu sehen, ein annähernd linearer Trocknungsverlauf ein.

Tabelle 4.2: Durchschnittliche, gemittelte Holzfeuchte der verschiedenen Probenvarianten in Abhängigkeit von der Zeit

		Entnahme							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Woche		0	2	5	8	11	14	17	20
Probenvariante	A	49.86%	40.44%	37.89%	32.39%	25.99%	19.11%	14.37%	12.83%
	B	43.87%	38.06%	34.50%	31.19%	26.60%	21.30%	16.96%	17.14%
	C	49.82%	39.17%	33.45%	26.99%	22.08%	17.28%	10.96%	9.98%
	D	48.26%	33.04%	34.12%	26.86%	21.57%	15.90%	10.43%	9.72%
	E	42.97%	37.98%	35.11%	33.57%	25.87%	19.14%	16.42%	13.89%
	F	44.60%	39.80%	35.68%	31.43%	26.37%	19.80%	19.13%	16.48%

Der Vergleich der Probenvarianten A, C und D (Ø30 cm) zeigt, dass die Holzfeuchtedifferenz zwischen den kernebohrten Proben (C & D) und den nicht kernebohrten Proben (A) am Ende der 20-Wöchigen Trocknung bei etwa 3% liegt. Auch bei der Untersuchung der Stämme mit grösserem Durchmesser (Ø50 cm) sind die kernebohrten Proben (E & F) trockner, als ihrer massiven Vergleichsproben (B). Hier zeigt sich allerdings eine kleinere durchschnittliche Holzfeuchtedifferenz von 2 %.

In Tab. 4.3 ist die durchschnittliche Feuchteänderung der Probekörper pro Woche, gemessen am Ort der Feuchtemessung, abgebildet. In den Aussenbereichen ist die Feuchteabnahme pro Woche noch

ausgewogen. Im Inneren des Holzes zeigt sich hingegen eine höhere Holzfeuchteänderung der kerngebohrten Proben im Vergleich zu ihren massiven Vergleichsproben.

Tabelle 4.3: Durchschnittliche Holzfeuchteänderung pro Woche in Abhängigkeit der Tiefe der Entnahme (n = 4)

		Ort der Entnahme im Holz [cm]								
		0 - 1.5	1.5 - 3	3 - 4.5	4.5 - 6	6 - 7.5	7.5 - 9	9 - 10.5	10.5 - 12	12 - 13.5
Probenvariante	A	1.66%	2.06%	2.24%	2.20%	2.11%	1.79%	1.64%	1.51%	1.45%
	B	1.42%	1.60%	1.64%	1.53%	1.38%	1.25%	1.11%	1.07%	1.04%
	C	1.64%	1.98%	2.17%	2.21%	2.19%	2.04%	1.93%	2.03%	1.74%
	D	1.83%	1.98%	1.95%	2.17%	2.25%	1.87%	1.82%	1.75%	1.73%
	E	1.40%	1.66%	1.64%	1.61%	1.52%	1.42%	1.21%	1.31%	1.32%
	F	1.24%	1.67%	1.73%	1.65%	1.56%	1.36%	1.19%	1.17%	1.08%

Die über den gesamten Bohrkern gemessene, wöchentliche Feuchteabnahme wird in Tabelle 4.4 dargestellt. Sie ergibt sich auf Grundlage der Daten aus Tabelle 4.3. Es zeigt sich, dass die kerngebohrten Proben im Durchschnitt 8.06 % mehr Feuchte pro Woche abgeben als die massiven Proben.

Tabelle 4.4: Differenz der durchschnittlichen Feuchteabnahmen von kerngebohrten zu massiven Proben

C zu A	D zu A	E zu B	F zu B	Ø
9.12%	7.38%	8.20%	7.53%	8.06%

Die Differenz der Feuchteabnahme würde noch höher ausfallen, wenn man mit dem Zapfenbohrer bis zur Kernbohrung in der Mitte des Stammes dringen und auch dort Feuchteproben entnehmen würde. Innerhalb der Stämme mit kleinerem Durchmesser war es zum Teil möglich durch die 2 Zapfenbohrungen bis an die Kernbohrung heran Feuchtwerte aufzunehmen (Vgl. Abb. 3.7). Bei den Proben mit grossem Durchmesser konnte durch die limitierte Bohrzapfenlänge von 13.5 cm (zusammengesetzt) der Kern nicht erreicht werden. In dem, durch die Messung nicht erfassten Bereich (≤ 13.5 cm bis zur Kernbohrung) sind die grössten Unterschiede zwischen den kerngebohrten und den massiven Proben zu erwarten. Es würde sich zeigen, dass die kerngebohrten Proben mehr als 8,06 % mehr Feuchte im gleichen Zeitraum wie ihre massiven Referenzproben abgeben.

Feuchteprofil in radialer Richtung

Da es sich bei den gemessenen Werten der Holzfeuchte um ortsspezifische Werte handelt, ist es sinnvoll diese Werte in Form eines Feuchteprofils zu betrachten. Durch den Feuchteverlauf quer zu den Jahrringen kann der Feuchtegradient, der sich in radialer Richtung zum Stamm einstellt, zwischen den einzelnen Probevarianten verglichen werden.

Betrachtet man das Feuchteprofil der Stämme, zeigen sich deutlich unterschiedliche Feuchteverläufe. In Abb. 4.5 und 4.6 sind die Feuchteprofile der Probenreihe A als Vertreter der nicht gebohrten und C, als Vertreter der gebohrten Proben, zu sehen. Sie zeigen die Feuchte an verschiedenen Stellen der 13.5 cm langen Bohrzapfen, die dem Holz zur Feuchteanalyse im Verlauf der Trocknung entnommen wurden.

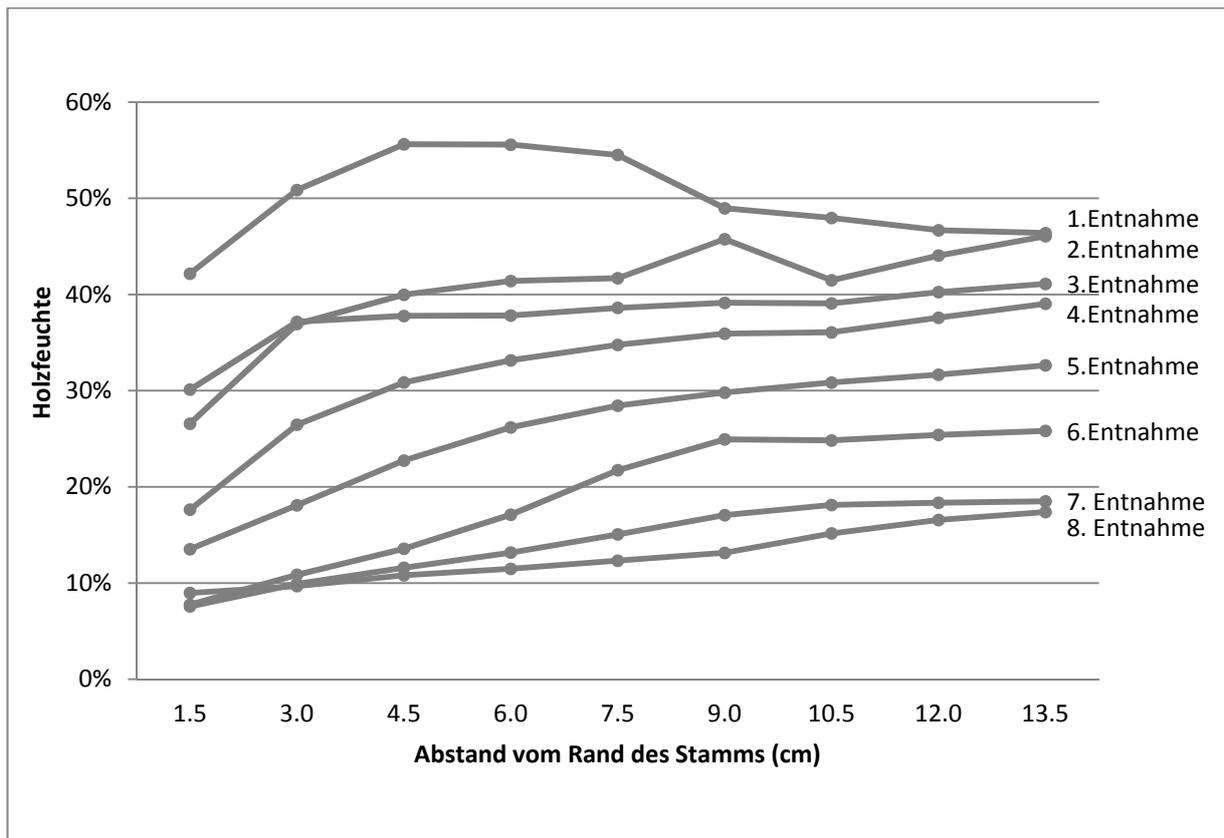


Abbildung 4.5: Feuchteprofil radial zum Stamm – gemittelte Werte der nicht kerngebohrten Probenvariante A

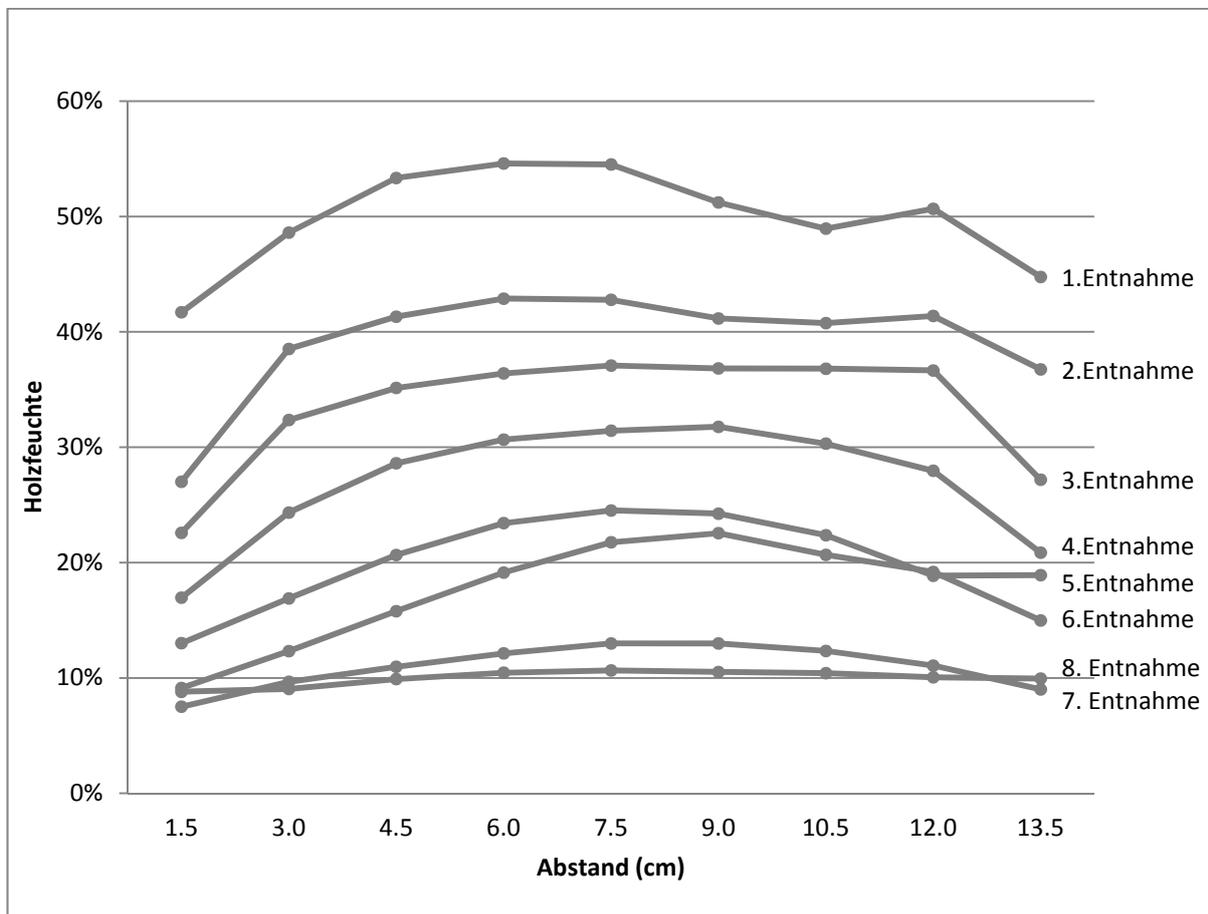


Abbildung 4.6: Feuchteprofil radial zum Stamm – gemittelte Werte der kerngebohrte Probenvariante C

Bei allen Probevarianten fällt auf, dass mit zunehmender Trocknungsdauer die anfänglichen Feuchteunterschiede zwischen Splint und Kernholz ausgeglichen werden. Die zu Beginn der Trocknung ermittelten Holzfeuchtwerte schwanken noch stark. Dies fällt vor allem bei einem Blick auf die Einzelmessungen auf.

Bei den massiven Stämme der Probenreihe A und B zeigt sich ab der 3. Entnahme (nach 5 Wochen der Trocknung), ein Anstieg der Feuchte bis in das Kernholz. Das Feuchteprofil lässt sich nun als eine flache Wurzelfunktion beschreiben, bei der der Anstieg des Verlaufes mit steigender Bohrtiefe sinkt. Am Ende der Trocknungszeit von 20 Wochen besteht noch ein Feuchtegefälle von etwa 8 % HF zwischen dem Aussenbereich und dem Inneren des Stammes.

Im Falle der kernebohrten Proben, kommt es zu einem gewölbten Feuchteprofil, welches zu den freiliegenden Flächen, wie dem Stammmantel oder der Mantelfläche des gebohrten Kerns, deutlich abfällt. Dabei ist die Feuchte an der Stammaussenseite, in Folge der grösseren spezifischen Fläche, stets geringer, als an der Kernbohrung im Inneren des Stammes.

Der Feuchtegradient gibt die Differenz zwischen dem minimalen und maximalen Feuchtwert einer Analysebohrung (2 Bohrzapfen zusammengesetzt) an. In Abb. 4.7 und 4.8 ist die Entwicklung des Feuchtegradienten über den gesamten Trocknungsverlauf dargestellt.

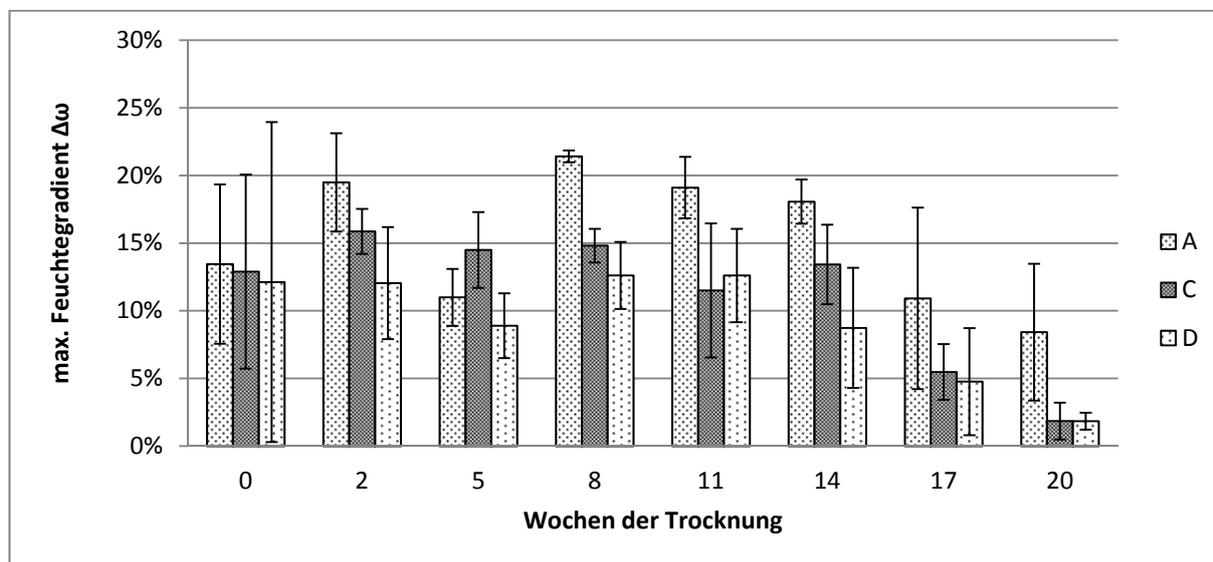


Abbildung 4.7: Durchschnittlicher max. Feuchtegradient innerhalb des Bohrkerns der Probenreihen A, C und D - Ø 30

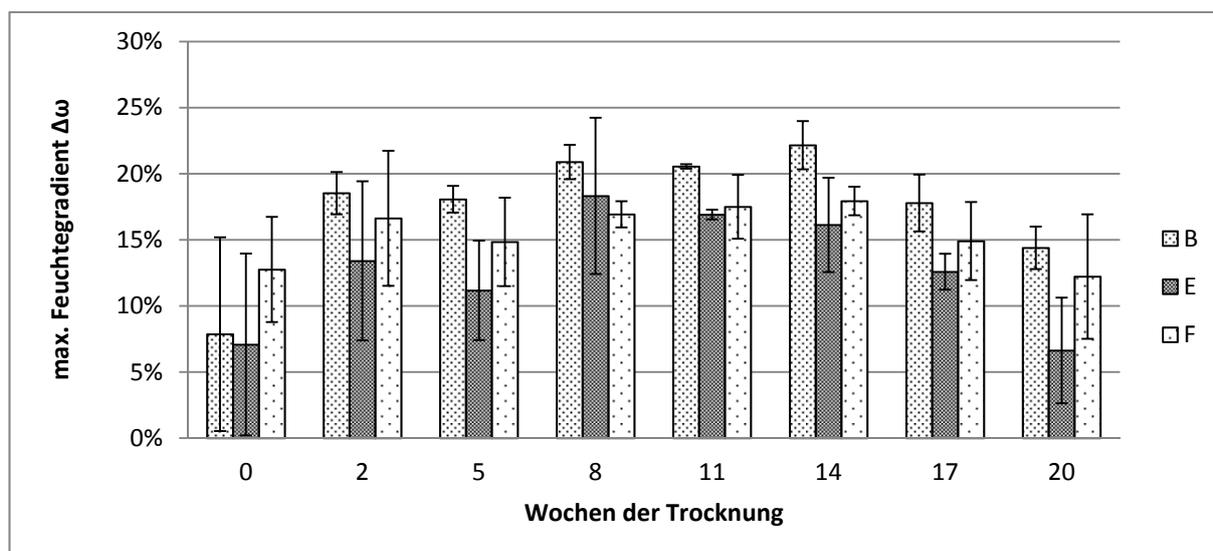


Abbildung 4.8: Durchschnittlicher max. Feuchtegradient innerhalb des Bohrkerns der Probenreihen B, E und F - Ø 50

Die Diagramme zeigen, dass die kernebohrten Stämme einen geringeren Feuchtegradienten und somit ein homogeneres Feuchteprofil über den Querschnitt haben. Dieser Unterschied lässt sich vor

allein bei den Stämmen mit kleinerem Durchmesser deutlich erkennen, was aber durch der begrenzten Tiefe des Zapfenbohrers von 13,5 cm stark beeinflusst wird.

Der Feuchtegradient innerhalb des Holzes steht im direkten Zusammenhang zu den auftretenden Trocknungsspannungen und somit zu der Trocknungsqualität. Je geringer die Feuchteunterschiede im Holz, also je ausgeglichener das Feuchteprofil ist, desto weniger Holzfehler treten auf, was den Werterhalt des Holzes sichert. Allerdings sind die maximalen Feuchtwerte bei den massiven Stämmen in der Nähe des Kerns. Dies entspricht dem letzten Abschnitt der genommenen Bohrzapfen zwischen, 12 und 13.5 cm Bohrtiefe. Bei den gebohrten Proben befinden sich die maximalen Feuchtwerte zwischen 7.5 und 10.5 cm (Vgl. Abb. 4.6-7). Da sich die Minimalwerte aller Stämme im ersten Bereich hinter der Mantelfläche zwischen 0 und 1.5 cm befindet, ergeben sich unterschiedliche Wege, über der der Feuchtegradient betrachtet werden muss.

Setzt man den Feuchtegradienten in das Verhältnis zum Weg zwischen Minimal- und Maximalwert, so relativieren sich die Feuchtegradienten weitestgehend. Diese Art die Ergebnisse zu interpretieren setzt allerdings einen linearen Feuchteverlauf zwischen dem Minimal- und Maximalwerten voraus.

Um den ortsspezifischen Feuchteverlauf im Holz zu berücksichtigen, mussten die Einzelwerte der Feuchtemessungen miteinander verglichen werden. Dazu wurden die ortsspezifischen Feuchtedifferenzen zwischen den benachbarten Probekörpern (1.5cm breit) innerhalb eines Bohrkerns bestimmt. Die maximale Feuchtedifferenz (über die Strecke von 1.5cm) innerhalb eines Zapfens wurde nun als Vergleichswert angelegt. In Abb. 4.9 und 4.10 ist zu sehen, dass es innerhalb der zentriert Kerngebohrten Proben (C & E) zu den geringsten ortsspezifischen Feuchtegradienten kam. Der Unterschied zwischen den Feuchtegradienten wird mit zunehmender Trocknungszeit deutlicher. Die Werte der dezentriert gebohrten Proben sind innerhalb der Probekörper mit grossem Durchmesser auf dem gleichen Niveau wie die der massiven Vergleichsproben.

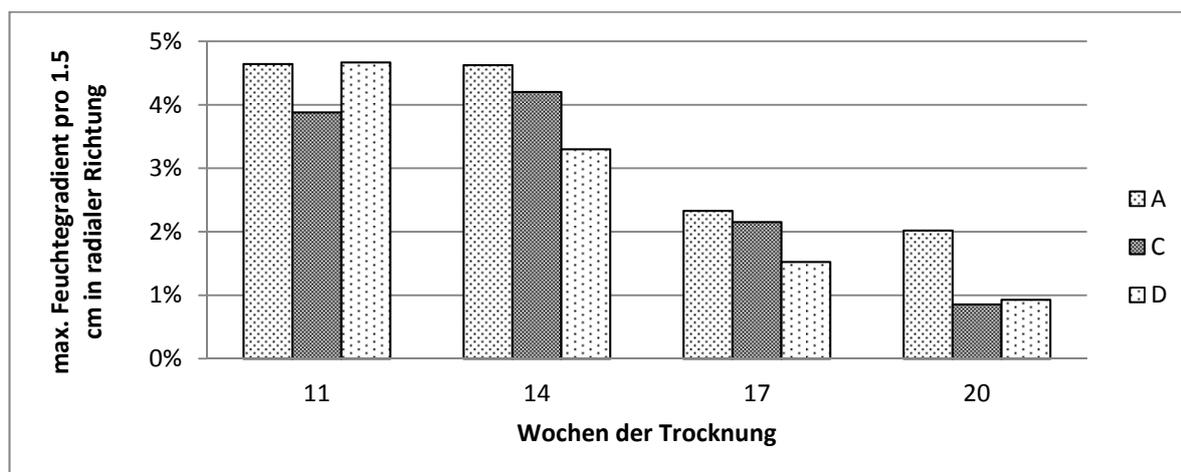


Abbildung 4.9: Max. ortsspezifischer Feuchtegradient innerhalb einer Strecke von 1.5 cm - Probenreihe A, C und D -Ø 30

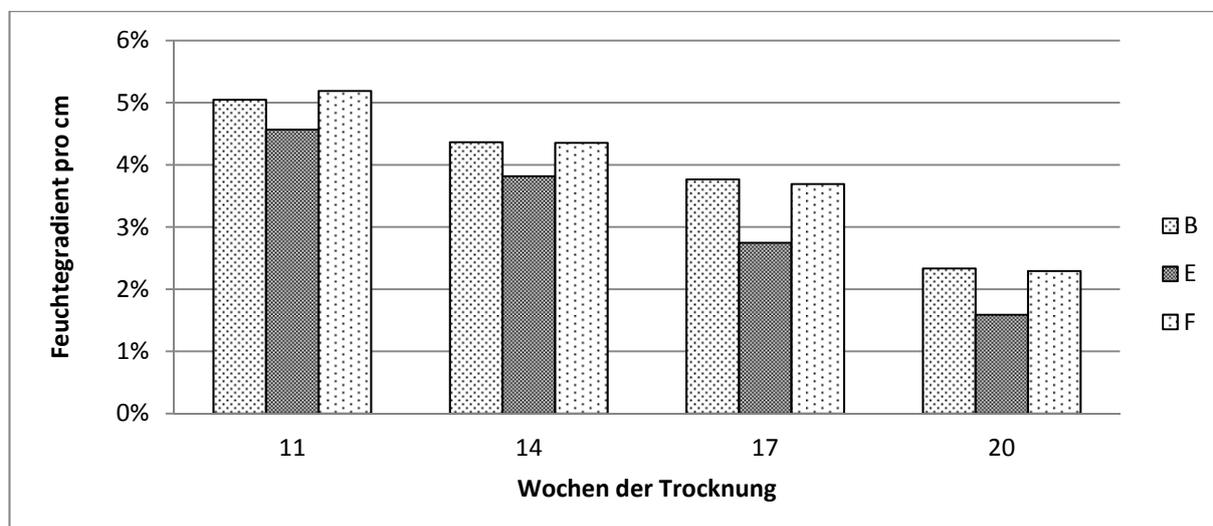


Abbildung 4.10: Max. Feuchtegradient benachbarter Proben innerhalb einer Analysebohrung - Probenreihe B, E und F -Ø

Feuchteentwicklung in longitudinaler Richtung

Zusätzlich zur radialen Feuchteentwicklung wurde die Feuchteentwicklung längs zur Faserrichtung untersucht. Dazu wurden zusätzlich zur Bohrung in der Mitte des Stammes, 2 weitere Bohrungen, im Abstand von 10 cm zu beiden Stirnseiten, durchgeführt. Der Vergleich der ermittelten Feuchteprofile an den 3 Bohrzapfen dient einer Aussage über die longitudinale Feuchteentwicklung.

Stellvertretend für die kerngebohrten und die massive Probenvarianten sind in Abb. 4.11 (a)-(e) die radialen Feuchteverläufe der Probenvarianten B und E in Abhängigkeit der Trocknungsdauer, zu Beginn der Trocknung, nach 11, sowie nach 14 Wochen Trocknung dargestellt.

Das Feuchteprofil aller 3 Bohrungen ist zu Beginn der technischen Trocknung noch sehr heterogen. Mit fortschreitender Trocknungszeit stellen sich homogenere Feuchteverteilungen ein. Die anfänglich sehr unterschiedlichen Feuchten zweier nebeneinander liegenden Probestücke innerhalb eines Zapfens nähern sich einander an. Gleichermassen sinken die Feuchtwerte in der Nähe der Stirnflächen sehr schnell. Das Holz trocknet nahe der Stirnfläche über den gesamten Querschnitt schneller und bildet daher geringe Feuchteunterschiede aus. Nach etwa 5 Wochen in der Trocknungskammer sind die ermittelten Feuchtwerte der Bohrung an den Stirnseiten zum ersten Mal signifikant geringer, als in der Mitte des Stammes. Danach vergrössert sich der Trocknungsvorsprung immer weiter (Abb. 4.11 (c) & (d)). Die Holzfeuchte ist in einem Abstand von 10 cm zum Stammende nach 14 Wochen über den gesamten Querschnitt annähernd gleich (Abb. 4.11 (e) & (f)). Der Unterschied der Trocknungsgeschwindigkeiten zwischen den kerngebohrten und den massiven Stämmen ist in einem Abstand von 10 cm zum Stirnholz nicht signifikant.

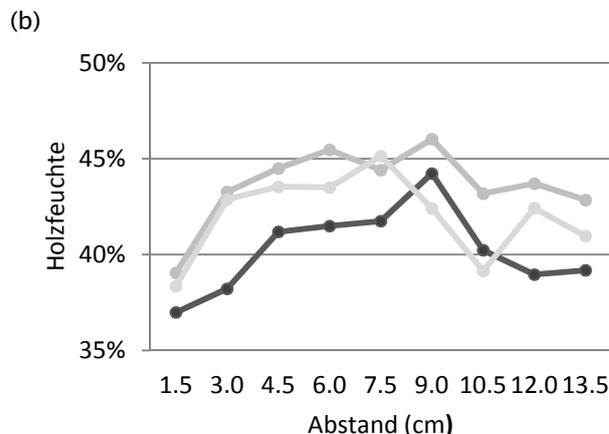
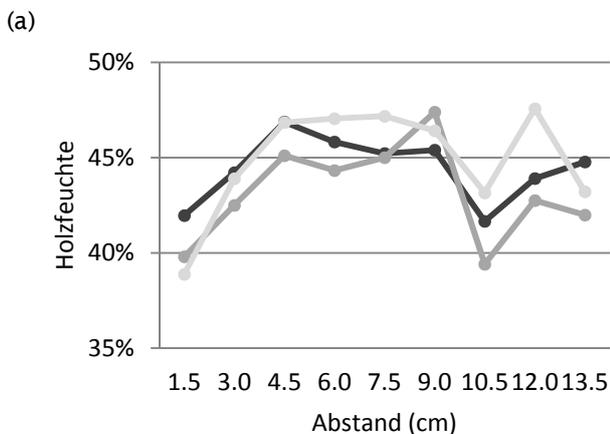
Im Bereich der halben Stammlänge kommt es bei allen Proben zu einer deutlich langsameren Trocknung. Es bildet sich wie stark unterschiedliche Feuchteprofile zwischen den kerngebohrten und massiven Proben aus, die sich bis zum Ende der Trocknung nur langsam abflachen. Das Wasser kann nicht in Faserrichtung entweichen, sondern wird quer zu den Fasern und schliesslich über die Aussenfläche des Stammes aus dem Holz transportiert. Dies führt dazu, dass sich in den letzten Zentimetern unterhalb der Mantelfläche eine geringere Holzfeuchte einstellt. Die Holzfeuchte ist in den Innenbereichen des Stammes aber noch sehr hoch. Ein stark ausgeprägtes Feuchteprofil mit grossen Holzfeuchteunterschieden ist die Folge.

Wie für die Stämme mit einem Durchmesser von 50 cm dargestellt, verläuft die Trocknung auch bei den Stämmen mit dem 30 cm grossen Durchmesser innerhalb der verschiedenen Probevarianten annähernd gleich.

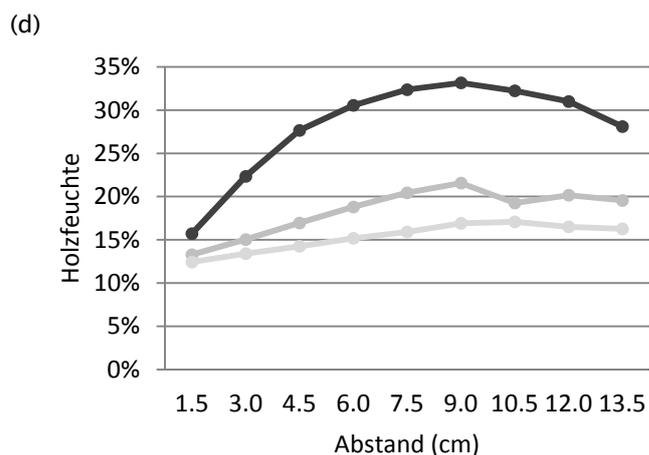
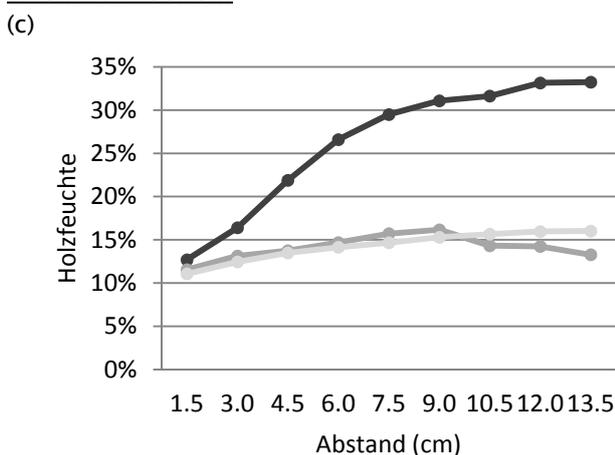
Es zeigte sich hinsichtlich der Trocknung kein signifikanter Unterschied zwischen der, dem Ventilator zugewandten Stirnseite und der, dem Ventilator abgewandten Stirnseite.

Vor Beginn der technischen Trocknung:

innen
 aussen 1
 aussen 2



Nach 11 Wochen:



Nach 14 Wochen:

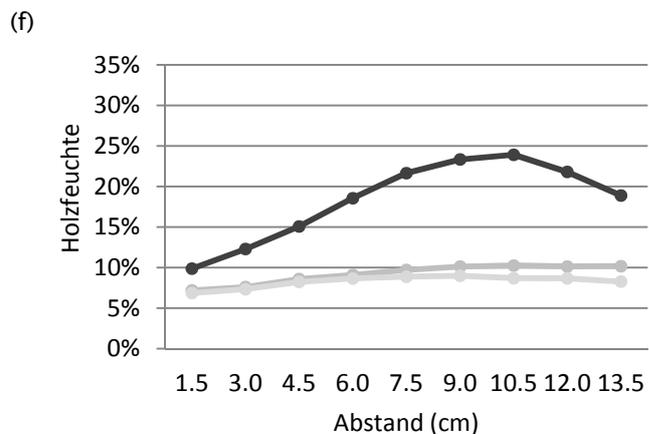
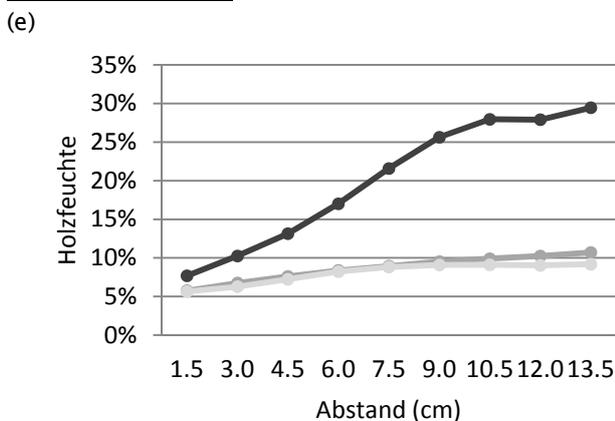


Abbildung 4.11: Feuchteprofile an innen und je 10 cm von der Stirnseite; (a),(c) und (e) - Probenreihe B ohne Kernbohrung; (b), (d) und (f) - Probenreihe E mit Kernbohrung

4.2.2 Spannungen im Holz

Für die Spannungsmessungen wurde zuerst der Fasersättigungspunkt ermittelt. Er wurde nach zuvor beschriebener Methode für die in dieser Arbeit untersuchte Buche auf 28,3% HF bestimmt. Dieser Wert ist deutlich niedriger als jene, die in der Literatur zu finden sind. Dies kann daran liegen, dass im Exsikkator, in welchem die Proben aufgefuechtet wurden, die nötige Luftfeuchte von 100% nicht erreicht wurde. So wird im Folgenden von einem etwas höheren FSP ausgegangen.

Spannungsermittlung über die Rissbreitemessung im Stirnholz

Kurz vor Erreichen des FSB wurden die Rissbreiten initial aufgenommen, bevor in einem regelmässigen Abstand von 3 Wochen die Rissbreiten immer wieder neu ausgemessen wurden. Die Tabelle 4.5 zeigt die durchschnittliche Summe der gemessenen Rissbreiten eines Stammes. In Anlage 7.2 sind die Bilder der Rissentwicklung der gesamten Proben dargestellt.

Tabelle 4.5: Durchschnittliche Rissbreite auf der Stirnseite der einzelnen Probenvariante

		Trocknungszeit in Wochen				
		8	11	14	17	20
Probenvarianten	A	24.62 mm	29.19 mm	32.24 mm	26.83 mm	26.89 mm
	B	30.92 mm	37.80 mm	42.44 mm	44.94 mm	40.01 mm
	C	20.73 mm	25.66 mm	33.26 mm	32.20 mm	27.55 mm
	D	17.44 mm	21.01 mm	29.00 mm	34.40 mm	26.51 mm
	E	19.29 mm	26.09 mm	27.51 mm	20.94 mm	19.36 mm
	F	20.25 mm	20.87 mm	47.15 mm	46.42 mm	45.79 mm

Aus den aufgenommenen Daten geht hervor, dass sich die Risse nach Unterschreiten des FSB zuerst weiteten, bevor sie sich zum Ende der Trocknung wieder verengten. Dies ist auf das zuvor beschriebene Feuchteprofil zurückzuführen. In den schnell getrockneten Aussenbereichen kommt es zum Schwinden des Holzes. Im Inneren des Stammes kommt es durch nur geringfügige Holzfeuchteänderungen zu einem langsameren Schwinden. In Folge dessen, aber auch auf Grund von extremem Schwinden in tangentialer Richtung entstehen Zugspannungen unterhalb der Mantelfläche der Stämme, die sich zum Teil in Form von Rissen entspannen. Anschliessend trocknen die Innenbereiche nach und das Holz schwindet nun im Inneren schneller als Aussen. Die hohen Zugspannungen werden langsam abgebaut und die Risse gehen wieder leicht zusammen.

Auffällig sind weiterhin die unterschiedlichen Anfangsrissbreiten. So erscheinen bei den kerngebohrten Stämmen nach 8 Wochen Trocknung und etwa 30 % Holzfeuchte wesentlich weniger, bzw. kleinere Risse. Zum Ende der Trocknung sind die Rissbreiten der Stämme des gleichen Durchmessers, mit Ausnahme der Probenvariante E, ähnlich. Auf der Stirnfläche des zentriert gebohrten Stammes der Probenreihe E lassen sich im Schnitt nur etwa halb so grosse Risse finden, wie auf den der vergleichbaren Stämmen der Probenreihe B und F (Abb. 4.13).

Es zeigt sich desweiteren, dass sich das Holz im Schnitt über 3 grössere Risse auf den Stirnseiten entspannt. Die z.T. angebrachten Spannungsnuten federn als Sollrissstelle ein Grossteil der Spannungen ab. Ist eine Spannungsnut angebracht so öffnet sich das Holz vorrangig dort und verschont andere Bereiche vor dem Einreissen (Abb. 4.12-13).



Abbildung 4.12: Rissausbreitung nach 14 Wochen Trocknung - Probenreihe A, C und D - Ø 30 cm

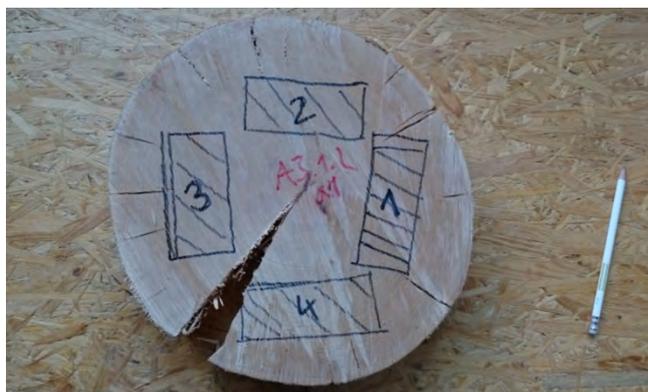


Abbildung 4.13: Rissausbreitung nach 14 Wochen Trocknung - Probenreihe B, E und F - Ø 50 cm

Die Untersuchung der Rissbreiten bietet einen guten Ansatz, um die verschiedenen Stämme hinsichtlich der Trocknungsqualität miteinander zu vergleichen. Vor allem die strukturelle Zerstörung des für die Weiterverarbeitung des Holzes ist von grosser Bedeutung. Jedoch darf dieser Methode keine zu grosse Wertung beigemessen werden, da sich die Untersuchung ausschliesslich auf die Rissausprägung auf der Stirnseite konzentriert. Die Risstiefe wurde nicht berücksichtigt. Zudem verlaufen die Risse nicht geradlinig vom Kern zum Mantel, sondern sind oft verschiedenartig ausgeprägt. Die Messungen wurden stets im Abstand von 3 cm zur Mantelfläche aufgenommen. Dadurch wurde die Heterogenität der Risse nicht berücksichtigt. Zudem wurden nur Risse aufgenommen, die grösser als 4 mm waren.

Analytische Spannungsermittlung

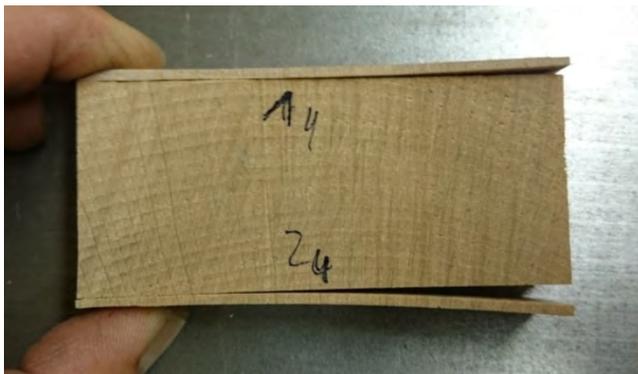
Nach 11 Wochen Trocknung wurden aus einem kerngebohrten und einem massiven Stamm je mehrere Scheiben heraus geschnitten. Aus diesen wurden wiederum Probekörper für die Spannungsermittlung, hergestellt. Durch die vielen vorhandenen Risse war es schwierig brauchbare Proben herauszuschneiden. Die Probekörper wurden nach *Archer* aufgetrennt und vermessen. Die Längenänderung ist stark von der Zeit abhängig, die zwischen dem Einschnitt und dem Vermessen der Probe vergeht. Um die Werte vergleichen zu können, wurden alle Leisten in einem zeitlichen Abstand von 5 Sekunden nach dem Trennschnitt ausgemessen (Abb. 4.14)



Einschnitt der Stämme zu Scheiben



Probestücke aus Holzscheibe schneiden



Auftrennen der Leisten und Ausmessen der Längenunterschiede

Abbildung 4.14: Probenzuschnitt für die Spannungsmessung

Entgegen der Erwartungen zeigten sich nach dem Einschnitt der Proben allerdings keine wesentlichen Längenänderungen. Weder im Holz der kerngebohrten, noch in dem der massiven Stämme liessen die Beobachtungen während der Versuchsdurchführung verwertbare Ergebnisse zu. Die Längenänderung bewegte sich sowohl in positive als auch negative Richtung innerhalb eines Bereiches von ≤ 1 mm. Bei einer Probenlänge von 100 mm entspricht dies einer Dehnung von unter 1 %.

Bei der Spannungsmessung variierten die Werte aller gemessenen Proben gleichermassen. Somit konnte die durchgeführte Spannungsmessung keinen Aufschluss über die Spannungsverhältnisse im Holz geben.

4.2.3 Verformungsversuch

Nachdem die Bohlen 2 Wochen über einem Wasserbecken aufgefuehctet wurden, war schon eine deutliche Verformung sichtbar (Abb. 4.15)



Abbildung 4.15: Verformung getrockneter Holzbohlen nach 2 Wochen über dem Wasserbad

Um die Verformungen vergleichen zu können, wurden die gemessenen Verformungen in das Verhältnis zur Bohlenbreite gesetzt. So werden die Verformungen an den jeweiligen Messstellen nach Tabelle 4.6 in μm pro cm Bohlenbreite angegeben.

Tabelle 4.6: Verformung nach 2 Wochen über dem Wasserbad (Messstellen nach Abb. 3.16)

Verformung [μm] pro [cm] Bohlenbreite							
	A	B	C	D	AD	BC	
A	106	233	188	124	153	226	
B	239	166	186	202	153	189	
C	168	193	210	123	155	116	
D	106	163	150	83	73	158	
E	197	211	271	170	176	206	
F	261	126	203	167	169	165	

Wie auch in Abb. 4.16 und 4.17 nochmal graphisch dargestellt ist aus den Ergebnissen der Verformungsversuche kein signifikanter Unterschied zwischen den Bohlen der ungebohrten und den Bohlen gebohrter Stämme hinsichtlich der Stärke der Schüsselung nach Aufgefuehctung zu erkennen.

Prüfkörper aus A, C und D

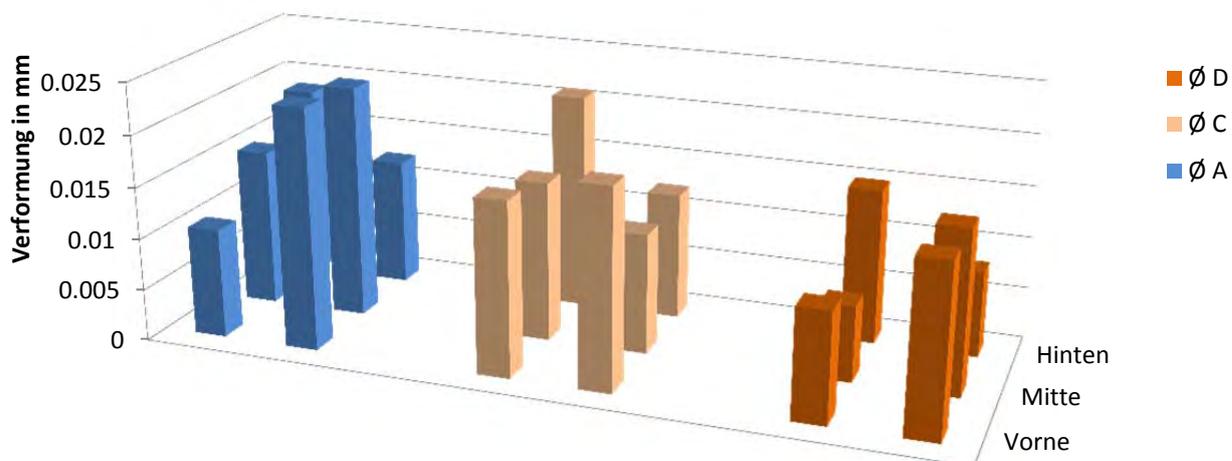


Abbildung 4.16: Verformung pro mm Brettbreite nach 2 Wochen auf Wasserbad – Prüfkörper aus 30cm dicken Stämmen

Varianten B, E und F

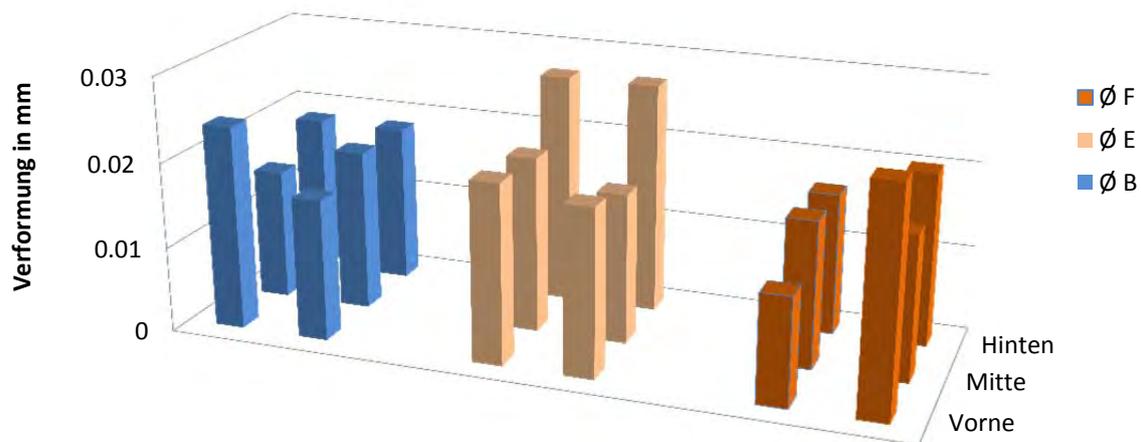


Abbildung 4.17: Verformung pro mm Brettbreite nach 2 Wochen auf Wasserbad – Prüfkörper aus 50cm dicken Stämmen

4.2.4 Weitere Trocknungsfehler

Bei Betrachtung der getrockneten Proben fallen auf den ersten Blick grosse Spannungsrisse auf. Diese traten vorwiegend an den Stirnseiten des Holzes auf und ziehen sich bis weit in das Zentrum des Stammes hinein (Abb. 4.18). Mittenrisse, die Innerhalb des Stammes entstanden und sich nicht bis zur Stirnseite zogen, gab es nicht. Es kam zu keinem Zellkollaps und zu keiner durch Trocknung verursachten Verfärbung. Anhand des aufgesägten Rundholzes, entsteht der Eindruck, dass es beim gebohrten Rundholz zu stärkeren Rissen kam als bei ungebohrten. Dies hängt aber auch damit zusammen wie die Schnitte auf der Bandsäge gesetzt wurden.



Abbildung 4.18: Aufgeschnittenes Buchenrundholz; ohne Kernbohrung (links), mit zentrierter Kernbohrung (Mitte) und mit dezentrierter Kernbohrung (rechts)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die technische Trocknung von Buchenholz ist bislang logistisch und energetisch aufwendig und bedarf einer präzisen Trocknungssteuerung. Der Verarbeitungsschritt Trocknung trägt deshalb massgeblich zu den Gesamtkosten bei der Herstellung von Buchenprodukten bei. Um diese Trocknungskosten zu reduzieren, wurde eine spezielle Art der Buchentrocknung für kleinere Betriebe entwickelt. Dabei wird das Holz in Form von Rundholz stehend getrocknet, wobei dem Holz zuvor das Kernmaterial durch eine durchgehende Bohrung entnommen wurde. Um festzustellen, in wie weit sich eine Kernbohrung auf die Trocknung von Rundholz auswirkt, wurden innerhalb dieser Arbeit Feuchte- und Spannungsuntersuchungen durchgeführt.

In einem Langzeit-Grossversuch werden die angelegten Buchenrundhölzer stehend in einem überdachten Turm getrocknet. Um diese freie Art der Trocknung zu simulieren, wurden Stämme des gleichen Einschlags während eines Laborversuchs in einem Frischluft-/Abluft-Trockner technisch getrocknet. Diese Simulation des Grossversuchs liess eine regelmässige Feuchteuntersuchung bei beschleunigter Trocknung zu.

Die Ergebnisse des Laborversuchs zeigen, dass sich die Trocknungsgeschwindigkeit der Rundhölzer durch eine Kernbohrung erhöhen lässt. Durch sie flacht das Feuchteprofil über den Querschnitt des Stammes, welches sich während der Trocknung aufbaut, ab. Der maximale Anstieg dieses Feuchteprofils ist bei den kerngebohrten Proben etwas geringer als bei den massiven Referenzproben. Es kommt innerhalb der kerngebohrten Stämme lokal zu geringeren Feuchtedifferenzen, welche die Spannungen massgeblich beeinflussen können. Die Analyse der Risse an den Stirnflächen der Stämme zeigt ebenfalls einen geringfügig positiven Einfluss der Kernbohrung auf die Trocknungsqualität.

Abschliessend ist festzustellen, dass die Rundholztrocknung der Buche für Verwendungen am Standort des Einschlags eine gute Möglichkeit darstellt, günstig trockenes Bauholz zu generieren. Generell ist die Buchenrundholztrocknung im Hinblick auf die Trocknungsqualität allerdings kritisch zu bewerten, da es zu hohen inneren Spannungen und somit zu Rissbildung in den Stämmen kommt. Eine Kernbohrung kann zu einer schnelleren Trocknung und auch zur Vermeidung von Rissbildung beitragen und bietet daher einen interessanten Ansatz für die Rundholztrocknung auch anderer Holzarten. Eine Entspannungsnut erhöht die Trocknungsqualität im Allgemeinen deutlich.

Mit Hilfe des noch laufenden Grossversuches werden sich Aussagen über die Wertschöpfung eines längeren kerngebohrten Stammes treffen lassen. Für eine quantitative Spannungsmessung sollten Stämme kleineren Durchmessers sanft getrocknet werden, so dass möglichst keine Spannungsrisse zur Spannungsrelaxation des Holzes führen. Somit würden sich die auftretenden Spannungen messen und vergleichen lassen.

Die Umsetzung des Projektes wird durch die „Natürlich Meister Holzart GmbH“ weiter vorangetrieben. Zum jetzigen Zeitpunkt ist bereits ein Gebäude im Bau (Ölmühle in der Nähe von Schaffhausen), mehrheitlich aus kerngebohrter Buche hergestellt. Ein drei-stöckiger Trocknungsturm (in Bibern) ist installiert mit einem Volumen von 140m³ Buchenrundholz, welches für zwei weitere Bauprojekte in diesem Jahr genutzt werden wird. (Bildmaterial siehe Anhang)

6 Literatur

- Archer, R. (1987). *Grwoth Stresses and Strains in Trees*. Berlin: Springer Verlag .
- Bertocchi, M., Frangi, A., Fontana, M. (2009). *Holzbauteile aus kernfreiem Laubholz - Schlussbericht*. Zürich.
- Brunner, R. (1987). *Die Schnittholztrocknung*. Hannover: n.N.
- Dünisch, O. (kein Datum). *DDS online*. Abgerufen am 05. 07 2016 von <http://www.dds-online.de/technik/maschinen-werkzeuge/schreinertauglich/#slider-intro-9>
- Jacob-Freitag, S. (2012). *Internationales Branchenforum für Frauen des Holzbaus und Innenausbau*.
- Koch, G., Bauch, J., Puls, J., Schwab, E., Welling, J. (Juni 2000). 126. *Holz-Zentralblatt*, S. 74-75.
- Kollmann, F. (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- Ingold, D. (1998). *Eurêka DEBCE / bois percé*. Biel: Ecole suisse d'ingénieurs et techniciens du bois (ESIB).
- Lang, A., Welling, J. (2001). *Trocknung von Rundholz - für trockenes Schnittholz im Bauwesen*. München: Absatzförderungsfonds der deutschen Forst- und Holzwirtschaft.
- Niemz, P. (1993). *Physik des Holzes und der Werkstoffe* . Leinfelden - Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co.
- Niemz, P. (2005). *Physik des Holzes*. - ETH Zürich
- Schnider, T. (2007). *Eignung mittlerer Stammabschnitte aus Schweizer Laubholz*. Zürich: ETH Zürich.
- Trübswetter, T. (2006). *Holztrocknung- Verfahren zur Trocknung von Schnittholz - Planung von Trocknungsanlagen*. München Wien: Carl Hanser Verlag.
- Vermass, H. (2000). *A review of drying technology for young fast grown eucalypts*. Launceston, Tasmania, Australia.
- Volkmer , T. (2003). *The application of Drying Simulation Software to be used for Spruce grwon in central Europe*. Burgdorf, Biel: Berner Fachhochschule .
- Volkmer, T. (2003). *The Appllication of a Drying Simulation Software to be used for Spruce grown in central Europe*. 8-16.
- Wagenführ, A., Scholz, F. (2012). *Taschenbuch der Holztechnik*. München: Carl Hanser Verlag .
- Wagenführ, R. (2000). *Holzatlas*. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Welling, J. (1987). *Die Erfassung von Trocknungsspannungen während der Kammertrocknung von Schnittholz*. Hamburg: MVR-Druck Köln.
- Welling, J. (1996). *Richtlinien "Trocknungsqualität"* .
- Welling, J., Lang, A.(2 1999). *Trocknung ganzer Stämme im Wald - Ein neuer Weg zu trockenem Bauholz*. *Holzforschung*, S. 26-28.
- k.A. - Tirol News (05. 09 2016). *Jahrhunderte alte Wasserleitungen entdeckt*. Abgerufen am 14. 11 2016 von tirol news: <http://tirol.orf.at/news/stories/2794869/>

7 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

7.1 Umfang des Berichts

Dieser Bericht besteht aus 51 Seiten inkl. Anhang.

8 Anlagen

8.1 Trocknungsregime

		Aufwärmen	TA1			TA2			
Laufzeit [h]		50	880	541	634	349	403	374	100
Temperatur [°C]	Start	0	45	50	50	55	60	60	65
	Ende	45	50	50	55	60	60	65	25
Holzfeuchte [%]		69.4	50	40	30	25	20	16	15.5
Feuchte [%]	Start	19	18	18	16	10	8.33	6.25	4.71
	Ende	18	18	16	10	8.33	6.25	4.71	16
TG	Start	3.7	2	2.5	2.5	3	3	3.2	3.4
	Ende	2	2	2.5	3	3	3.2	3.4	1
Drehzahl [%]	Start	60	60	80	80	80	80	80	80
	Ende	60	80	80	80	80	80	80	100

Trockenregime - Stand 26.05.2016

		TA1		TA2			
Laufzeit [h]		135	619	332	389	371	100
Temperatur [°C]	Start	50	50	55	60	60	65
	Ende	50	55	60	60	65	25
Holzfeuchte [%]		40	30	25	20	16	15.5
Feuchte [%]	Start	18	13.3	9.09	7.58	6.06	4.71
	Ende	13.3	9.09	7.58	6.06	4.71	16
TG	Start	3	3	3.3	3.3	3.3	3.4
	Ende	3	3.3	3.3	3.3	3.4	1
Drehzahl [%]	Start	80	80	80	80	80	80
	Ende	80	80	80	80	80	100

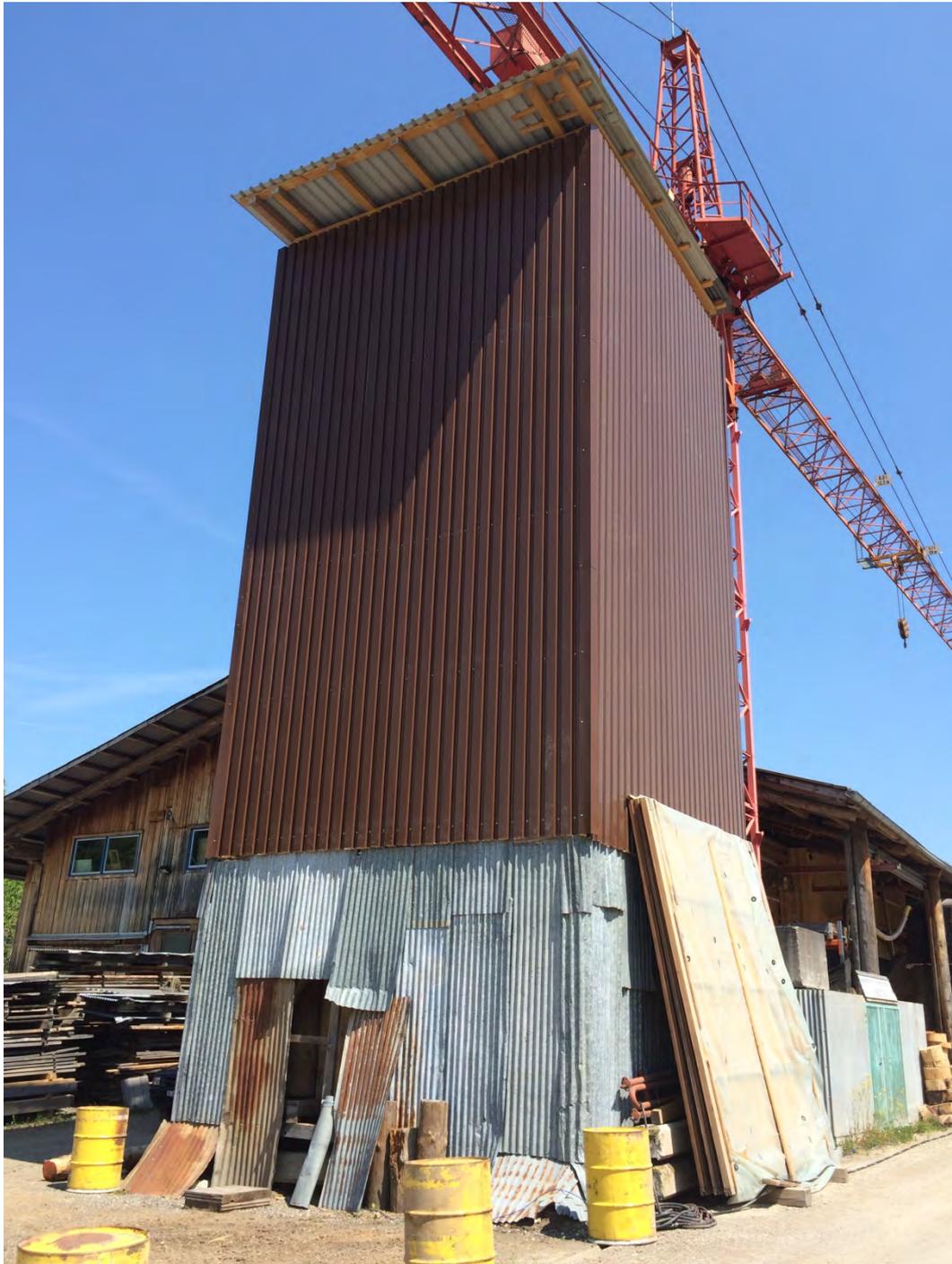
Trockenregime nach Änderung am 20.07.2016 – Aufwärmphase ist zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen und der Trocknungsabschnitt 1 aktiv

8.2 Ölmühle im Rohbau (bei Schaffhausen)



Alle tragenden Wände des Untergeschosses und Teile des Obergeschosses wurden aus kerngebohrtem Buchenrundholz gefertigt (Stand Mai 2017).

8.3 Trocknungsturm (Bibern)



Trocknungsturm in Bibern: gefüllt mit ca. 140m³ kerngebohrtem Buchenrundholz (Stand Mai 2017)

8.4 Rissentwicklung auf Stirnseite

Rissentwicklung der Probenreihe A

	A 6.2	A 6.1	A 3.1.2	A 3.1.1
1. Entnahme Zu Beginn der Trocknung				
2. Entnahme 2 Wochen Trocknung				
3. Entnahme 5 Wochen Trocknung				
4. Entnahme 8 Wochen Trocknung				
5. Entnahme 11 Wochen Trocknung				
6. Entnahme 14 Wochen Trocknung			Sägeschnitt	
7. Entnahme 17 Wochen Trocknung				
8. Entnahme 20 Wochen Trocknung				

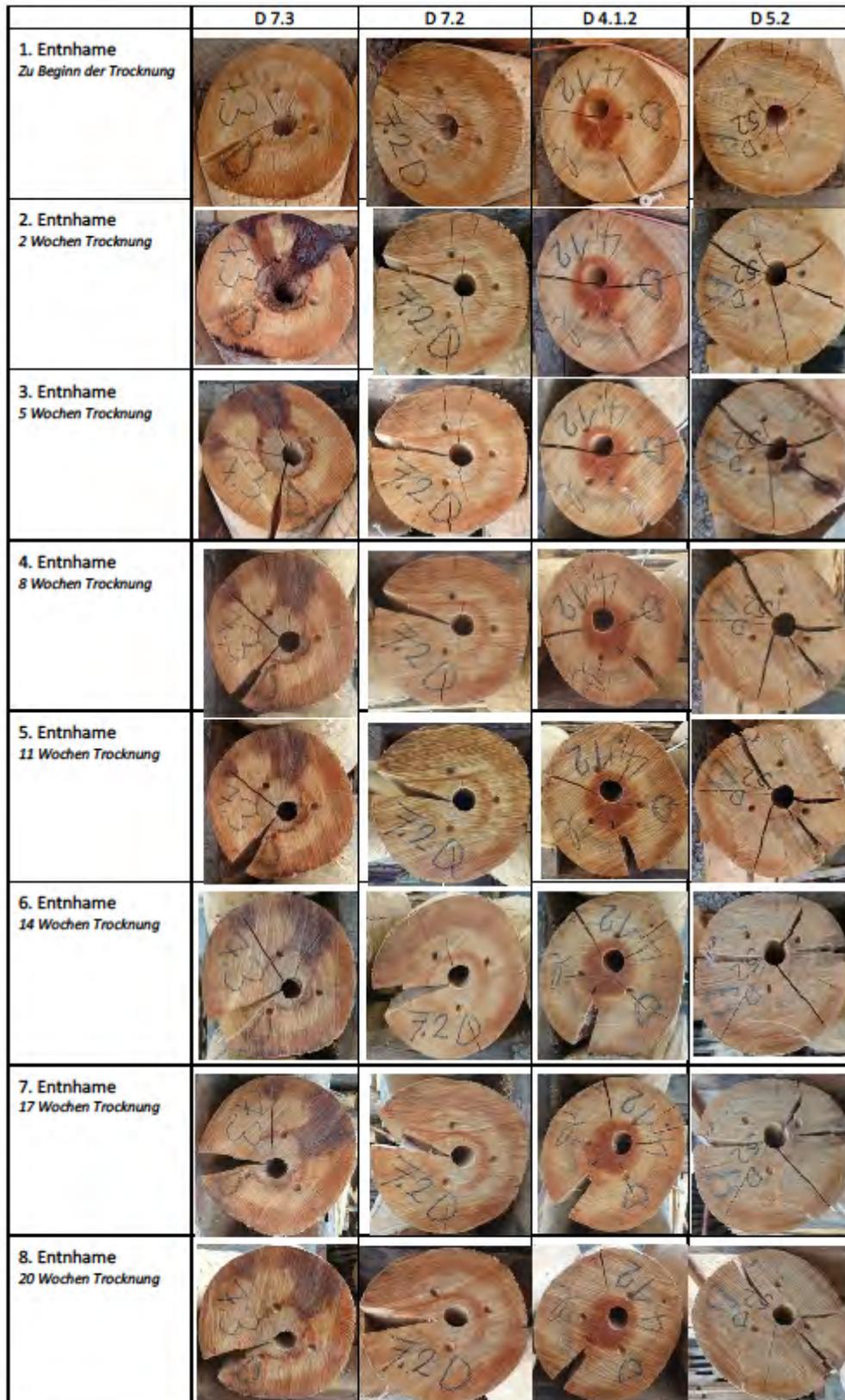
Rissentwicklung der Probenreihe B

	B 4.2	B 3.3	B 2.2	B 1.1
1. Entnahme <i>Zu Beginn der Trocknung</i>			Sägeschnitt	
2. Entnahme <i>2 Wochen Trocknung</i>				
3. Entnahme <i>5 Wochen Trocknung</i>				
4. Entnahme <i>8 Wochen Trocknung</i>				
5. Entnahme <i>11 Wochen Trocknung</i>				
6. Entnahme <i>14 Wochen Trocknung</i>				
7. Entnahme <i>17 Wochen Trocknung</i>				
8. Entnahme <i>20 Wochen Trocknung</i>				

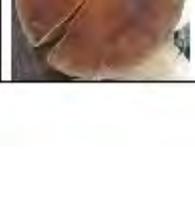
Rissentwicklung der Probenreihe C

	C7.1	C6.3	C5.3	C4.1.1
1. Entnahme <i>Zu Beginn der Trocknung</i>				
2. Entnahme <i>2 Wochen Trocknung</i>				
3. Entnahme <i>5 Wochen Trocknung</i>				
4. Entnahme <i>8 Wochen Trocknung</i>				
5. Entnahme <i>11 Wochen Trocknung</i>				
6. Entnahme <i>14 Wochen Trocknung</i>	Sägeschnitt			
7. Entnahme <i>17 Wochen Trocknung</i>				
8. Entnahme <i>20 Wochen Trocknung</i>				

Rissentwicklung der Probenreihe D



Rissentwicklung der Probenreihe E

	E 4.1	E 3.1	E 1.3	E 1.2
1. Entnahme <i>Zu Beginn der Trocknung</i>				
2. Entnahme <i>2 Wochen Trocknung</i>		Sägeschnitt		
3. Entnahme <i>5 Wochen Trocknung</i>				
4. Entnahme <i>8 Wochen Trocknung</i>				
5. Entnahme <i>11 Wochen Trocknung</i>				
6. Entnahme <i>14 Wochen Trocknung</i>				
7. Entnahme <i>17 Wochen Trocknung</i>				
8. Entnahme <i>20 Wochen Trocknung</i>				

Rissentwicklung der Probenreihe F

