

# **Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft**

## **Hamburg**

Leuschnerstraße 91 21031 Hamburg

## **Arbeitsbericht**

Instituts für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes

Nr. 2003 / 01

Juni 2003

### **Verbesserte Schmittholz Trocknung im Frischluf- / Ablufttrockner durch Wechselklima**

(Abschlussbericht AiF Vorhaben 11401 N aus 2000)

Johannes Welling, Torsten Riehl, Kai Kruse, Björn Rose

### **Bundesforschungsanstalt Für Forst- und Holzwirtschaft**

und das Holzwirtschaftliche Zentrum der

### **UNIVERSITÄT HAMBURG**



E-Mail: [welling@holz.uni-hamburg.de](mailto:welling@holz.uni-hamburg.de)

Tel: 040/73962619

Fax: 040/73962480



Das Forschungsvorhaben AiF 11401 N „Verbesserte Schnittholztrocknung im Frischluft-/Ablufttrockner durch Wechselklima“ wurde über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (DGfH), München, aus den Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V (AiF)„ Köln, gefördert.

Für die Finanzierung des Forschungsvorhabens durch die AiF und die konstruktive und tätige Mitarbeit des projektbegleitenden Ausschusses sei an dieser Stelle gedankt.

Dr. Johannes Welling, Dipl. Holzwirt Torsten Riehl, Dr. Kai Kruse, Dipl. Holzwirt Björn Rose

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Steuer- und Regeltechnik der Wechselklimatrocknung.....</b>	<b>6</b>
2.1	Aufbau des Mess- und Regelungssystems.....	7
2.1.1	Meßsystem.....	7
2.1.2	Regelungssystem.....	7
2.2	Komponenten der Trocknungsanlage.....	9
2.2.1	Computer.....	9
2.2.2	Schnittstelle.....	9
2.2.3	IDM und ISM Module.....	10
2.2.4	Multiplexer MUX.....	11
2.3	Software für die Steuerung und Regelung der Wechselklimatrocknung.....	11
2.3.1	Testpoint™.....	11
2.3.2	Aufbau der Benutzeroberfläche.....	13
2.3.2.1	Trocknungsplan.....	14
2.3.2.2	Holzfeuchte.....	17
2.3.2.3	Taktgeber.....	18
2.3.3	Elementare Programmbausteine.....	19
2.3.4	Messung der Führungsgrößen.....	19
2.3.5	Verarbeitung der Führungsgrößen.....	20
2.3.6	Regelung.....	20
<b>3</b>	<b>Regelalgorhythmus.....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>Auswirkung der Klimabedingungen auf die Trocknung.....</b>	<b>25</b>
4.1	Temperatur.....	25
4.1.1	Feuchtetransport.....	25
4.1.2	Gleichgewichtsfeuchte.....	26
4.1.3	Festigkeit.....	26

4.1.4	Spannungen .....	27
4.1.5	Trocknungsfehler .....	28
4.2	Luftfeuchte.....	28
4.3	Luftgeschwindigkeit.....	29
4.4	Wechselklima .....	29
4.4.1	Spannungsabbau durch zyklische Luftfeuchteschwankungen.....	30
<b>5</b>	<b>Trocknungsversuche.....</b>	<b>31</b>
5.1	Versuchsanordnung für Labortrockner .....	31
5.2	Versuchsdurchführung im Labormaßstab .....	33
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Trocknungen im Labormaßstab .....</b>	<b>38</b>
6.1	Regelungsgüte .....	38
6.1.1	Regelungsgüte der Temperaturregelung .....	38
6.1.1.1	Sprunghafte Änderung des Sollwertes <i>Temperatur</i>	39
6.1.1.2	Konstanter Sollwert <i>Temperatur</i>	39
6.1.2	Regelungsgüte der Luftfeuchterege lung .....	42
6.1.2.1	Sprunghafte Änderung des Sollwertes $u_{gl}$	42
6.1.2.2	Konstanter Sollwert $u_{gl}$	43
6.1.3	Schlussfolgerungen.....	47
6.2	Trocknungsdauer und Endfeuchten.....	47
6.3	Entfeuchtungsgeschwindigkeiten .....	49
6.4	Holzfeuchteverteilung über die Brett dicke.....	57
6.5	Qualität des Holzes hinsichtlich Verschalung und Trocknungsfehler .....	60
6.6	Ergebnisse der Buchenholztrocknungen.....	61
6.7	Diskussion.....	65
6.7.1	Einfluss des Wechselklimas auf die Trocknungsdauer .....	65
6.7.2	Einfluss des Wechselklimas auf die Feuchteverteilung.....	67
6.7.3	Einfluss des Wechselklimas auf die Spannungen .....	67
6.7.4	Fazit .....	67

<b>7</b>	<b>Ergebnisse der Trocknungen im halbindustriellen Maßstab</b>	<b>69</b>
7.1	Versuchsmaterial (Fichte), Vorbereitung der Trocknungsversuche .....	69
7.2	Trocknungsversuche im halbindustriellen Maßstab mit Fichtenholz .....	70
7.3	Ergebnisse der Fichtenversuchstrocknungen.....	71
7.3.1	Trocknungszeit .....	71
7.3.2	Trocknungsqualität .....	77
<b>8</b>	<b>Wertung / Chancen für eine Umsetzung in der Praxis .....</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>82</b>
<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>84</b>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Komponenten eines Regelkreises nach DIN 19226	8
<b>Abbildung 2:</b> Komponenten der Trocknungsanlage	9
<b>Abbildung 3:</b> Komponenten der Trocknerregelung	11
<b>Abbildung 4:</b> Testpoint <sup>TM</sup> : Oberflächenelemente	12
<b>Abbildung 5:</b> Benutzeroberflächen zum editieren und visualisieren von Unterprogrammen	14
<b>Abbildung 6:</b> Benutzeroberfläche Trocknung, Abschnitt Heizen	14
<b>Abbildung 7:</b> Benutzeroberfläche Trocknung, Abschnitt Trocknung	16
<b>Abbildung 8:</b> Benutzeroberfläche Trocknung, Abschnitt Konditionieren	17
<b>Abbildung 9:</b> Benutzeroberfläche Holzfeuchte	18
<b>Abbildung 10:</b> Ebenen der Prozessführung einer Trocknung durch Wechselklima	20
<b>Abbildung 11:</b> Antwortverhalten des P-, I-, D-Anteils	23
<b>Abbildung 12:</b> Antwortverhalten des gesamten PID-Reglers.	23
<b>Abbildung 13:</b> Schnittmuster für Versuchsmaterial und Ermittlung der Anfangsfeuchte	31
<b>Abbildung 14:</b> Anordnung der Stapel im Trockner (Kiefer 30 mm = 7 Lagen, Buche 60 mm = 4 Lagen)	32
<b>Abbildung 15:</b> Längsschnitt eines Kiefern Brettes mit Einschlagtiefen [mm] der Elektroden	32
<b>Abbildung 16:</b> Differenz der Mittelwerte vom Sollwert bezüglich des Temperaturniveaus (Kiefer)	40
<b>Abbildung 17:</b> Standardabweichung der Temperatur bezüglich der Temperaturniveaus	42
<b>Abbildung 18:</b> Abweichung des $u_{gl}$ -Mittelwertes vom Sollwert. Versuch 1 bis 3	44
<b>Abbildung 19:</b> Abweichung des $u_{gl}$ -Mittelwertes vom Sollwert bei 65°C und 70°C	45
<b>Abbildung 20:</b> Standardabweichung des $u_{gl}$ bezüglich der Feuchtestufen	46
<b>Abbildung 21:</b> Standardabweichung des $u_{gl}$ bezüglich der Feuchtebereiche	47
<b>Abbildung 22:</b> Trocknungsdauer der Holzfeuchteintervalle, Versuche K1 bis K3 (Kiefer)	51
<b>Abbildung 23:</b> Trocknungsdauer für verschiedene Holzfeuchteintervalle (Kiefer)	51
<b>Abbildung 24:</b> Entfeuchtungsgeschwindigkeit der einzelnen Holzfeuchtebereiche (80 % bis 8 %), Versuche K1 bis K3	52
<b>Abbildung 25:</b> Entfeuchtungsgeschwindigkeit der einzelnen Holzfeuchtebereiche (24 % bis 8 %), Versuche K1 bis K3	53
<b>Abbildung 26:</b> Entfeuchtungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Holzfeuchtebereich (Versuche K5 und K6)	54
<b>Abbildung 27:</b> Verläufe der gravimetrisch ermittelten Holzfeuchten. Versuch K1 bis K3 (Kiefer)	55
<b>Abbildung 28:</b> Verläufe der elektrisch gemessenen Holzfeuchten. (Versuch K1 bis K3)	55
<b>Abbildung 29:</b> Phasengleiche Schwankungen der Luft- und Holzfeuchte in Versuch K2	56

<b>Abbildung 30:</b> Differenz der Holzfeuchte zwischen Oberfläche und Brettmitte (Versuche K1 bis K3)	58
<b>Abbildung 31:</b> Differenz der Holzfeuchte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode der Versuche K1 bis K3 (Kiefer), Darstellung über die Holzfeuchte	58
<b>Abbildung 32:</b> Differenz der Holzfeuchte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode der Versuche K5 und K6 (Kiefer), Darstellung über die Zeit	59
<b>Abbildung 33:</b> Differenz der Holzfeuchte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode der Versuche K5 und K6, Darstellung über die Holzfeuchte	59
<b>Abbildung 34:</b> Trocknungsverlauf der Buchentrocknungen B1- B3	62
<b>Abbildung 35:</b> Dauer von vergleichbaren Trocknungsintervallen bei den Buchenholztrocknungen B1 - B3	63
<b>Abbildung 36:</b> Vergleich der Entfeuchtungsgeschwindigkeit von Versuch K3 und Versuch K5	66
<b>Abbildung 37:</b> Verlauf Trocknung F1 (Referenz)	72
<b>Abbildung 38:</b> Verlauf Trocknung F2 ( $\pm 2\%$ $u_{gl}$ / 2 h)	72
<b>Abbildung 39:</b> Verlauf Trocknung F3 ( $\pm 2\%$ $u_{gl}$ / 4 h)	72
<b>Abbildung 40:</b> Zeitbedarf für Durchschreitung des Feuchteintervalls von 58% bis 12% für die Fichtentrocknungen F1 - F3	73
<b>Abbildung 41:</b> Verlauf Trocknung F4 (Referenz)	75
<b>Abbildung 42:</b> Verlauf Trocknung F5 ( $\pm 2\%$ $u_{gl}$ / 2 h)	75
<b>Abbildung 43:</b> Verlauf Trocknung F6 ( $\pm 2\%$ $u_{gl}$ / 4 h)	75
<b>Abbildung 44:</b> Zeitbedarf für Durchschreitung des Feuchteintervalls von 54% bis 15% für die Fichtentrocknungen F4 - F6	76
<b>Abbildung 45:</b> Gesamtübersicht über den Zeitbedarf für Durchschreitung von Feuchteintervallen	76

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	Regelungsstrategien für die technische Schnittholz Trocknung	4
<b>Tabelle 2:</b>	Einfluß der Temperatur auf die Festigkeiten (GERHARDS 1982)	27
<b>Tabelle 3:</b>	Temperatur und Gleichgewichtsfeuchte (Grundtrocknungsplan für Kiefer)	34
<b>Tabelle 4:</b>	Temperatur und Gleichgewichtsfeuchte (Grundtrocknungsplan für Buche)	34
<b>Tabelle 5:</b>	Auflistung der $u_{gl}$ -Vorgaben für Trocknungsversuche K1 bis K6 mit Kiefernspiltholz	35
<b>Tabelle 6:</b>	Auflistung der $u_{gl}$ -Vorgaben für Trocknungsversuche B1 bis B3 mit Buchenholz	35
<b>Tabelle 7:</b>	Trocknungsbedingungen der Versuche K1 bis K6 mit Kiefernspiltholz	36
<b>Tabelle 8:</b>	Trocknungsbedingungen der Versuche B1 bis B3 mit Buchenholz	37
<b>Tabelle 9:</b>	Regelungsgüte bei sprunghafter Änderung des Sollwertes der Temperatur	39
<b>Tabelle 10:</b>	Regelungsgüte bei sprunghafter Änderung des Sollwertes des $u_{gl}$	43
<b>Tabelle 11:</b>	Endfeuchten der Proben und die Dauer der Trocknungsversuche mit Kiefer	49
<b>Tabelle 12:</b>	Trocknungsdauer der Holzfeuchteintervalle in 10 %-Schritten (Kiefer)	50
<b>Tabelle 13:</b>	Verschalung der Proben und die Standardabweichung der Verschalung (Kiefer)	60
<b>Tabelle 14:</b>	Endfeuchten der Proben und die Dauer der Trocknungsversuche mit Buche	62
<b>Tabelle 15:</b>	Verschalung der Proben und die Standardabweichung der Verschalung (Buche)	64
<b>Tabelle 16:</b>	Trocknungspläne für die Fichtentrocknungen im halbindustriellen Maßstab	70
<b>Tabelle 17:</b>	Übersicht über Endfeuchte, Feuchtestreuung und Verschalung bei den halbindustriellen Fichtenholz Trocknungen	77
<b>Tabelle 18:</b>	Unterschiede zwischen kleinen und großen Trocknern im Hinblick auf die Anwendung von Wechselklimabedingungen	80

## Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit
$\varepsilon$	Dehnung	mm
$\varphi$	relative Luftfeuchtigkeit	-
$\sigma$	Spannung	N/mm <sup>2</sup>
$\vartheta$	Temperatur	°C, K
$\eta$	Viskosität	
$\varphi_a$	absolute Luftfeuchtigkeit	kg/m <sup>3</sup>
$D_{BL}$	longitudinale Diffusionsgeschwindigkeit	cm <sup>2</sup> /s
$D_{BT}$	transversale Diffusionsgeschwindigkeit	cm <sup>2</sup> /s
$E$	E-Modul	N/mm
$E_b$	Aktivierungsenergie für Diffusion	J/mol
$e_{max}$	Überschwingweite	% o. Abs.

$K_{DR}$	konstanter Übertragungsbeiwert des D-Reglers	-
$K_{IR}$	konstanter Übertragungsbeiwert des I-Reglers	-
$K_{PR}$	konstanter Übertragungsbeiwert des P-Reglers	-
$L$	überströmte Länge	cm
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/h
$m$	Masse	kg
$m_A$	Anfangsgewicht der Charge	kg
$m_D$	Masse Wasserdampf	kg
$m_F$	aktuelles Gewicht der Charge	kg
$m_L$	Masse Reinluft	kg
$n$	Mol	-
$p$	Druck	Pa
$p_D$	Partialdruck des Wasserdampfes	Pa
$p_i$	Partialdruck einer Gaskomponente	Pa
$p_L$	Partialdruck der Luft	Pa
$p_S$	Sättigungsdampfdruck	Pa
$R$	(allgemeine) Gaskonstante	J/(kg K)
$r$	Radius	cm
$Re$	Reynolds-Zahl	-
$R_m$	molare (universelle) Gaskonstante	J/(mol K)
$T$	Temperatur	K
$t_e$	Ausregelzeit	s
$T_a$	Abtastzeit	s
$T_D$	Zeitkonstante	s
$t_{max}$	Dauer bis zu $e_{max}$	s
$t_n$	augenblicklicher Zeitpunkt	-
$u$	(absolute) Holzfeuchte	%
$u_A$	Anfangesholzfeuchte	%
$u_F$	aktuelle Holzfeuchte	%
$u_{gl}$	Holzgleichgewichtsfeuchte	%
$v$	Geschwindigkeit	m/s
$V$	Volumen	$m^3$
$V_{Fl}$	Volumen der feuchten Luft	$m^3$
$x$	Eingangssignals der Regelung	-
$x$	Wassergehalt feuchter Luft	kg/kg
$y$	Stellgröße	-

# Verbesserte Schnittholztrocknung im Frischluft-/Ablufttrockner durch Wechselklima

## 1 Einleitung

Die technische Schnittholztrocknung ist eine wichtige Voraussetzung für die Weiterverarbeitung von Schnittholz. Die langen Trocknungszeiten sowie die steigenden Ansprüche an die Trocknungsqualität stellen für die mittelständische Holzbe- und verarbeitende Industrie eine große Herausforderung dar.

### Situation der Schnittholztrocknung in Deutschland

Die Trocknung von Schnittholz nach dem Frischluft-/Abluftprinzip (F/A) ist in Deutschland das bei weitem am häufigsten angewandte Trocknungsverfahren, trotz beachtlicher Fortschritte bei der Entwicklung und Markteinführung von alternativen Trocknungsverfahren wie z.B. der Heißdampf-Vakuumtrocknung (Ressel 1993, Brunner 1997a, b). Schätzungen von Experten besagen, dass es sich bei den ca. 5.000 in Deutschland betriebenen Schnittholztrocknern zu 80 bis 90 % um F/A-Trockner handelt (Welling 1987). Trotz der vergleichsweise geringen Wirkungsgrade von  $\eta = 0,15 - 0,4$  (Ressel 1986) wird die F/A-Trocknung in der Praxis wegen ihrer universellen Einsetzbarkeit für praktisch alle Schnittholzsortimente gerne eingesetzt, zumal die Bereitstellung von ausreichenden Mengen an thermischer Energie durch Restholzverwertung vielen Betrieben der Be- und Verarbeitung von Holz keine Probleme bereitet.

### Fortschritte im Bereich der F/A-Trocknung

Die Fortschritte im Bereich der F/A-Trocknung in den letzten 15 Jahren waren geprägt durch die Einführung von digitalen Steuerungen, die es mittlerweile erlauben, praktisch beliebige Trocknungspläne zu verwirklichen (Welling 1990). Die heute in der Praxis verwendeten Trocknungspläne sind das Ergebnis theoretischer Überlegungen zum optimalen Trocknungsablauf und praktischer Erfahrung (Tabelle 1). Im Bereich der Optimierung wurde in den vergangenen Jahren der Reduzierung des Verbrauchs an elektrischer Energie (Drehzahlsteuerung der Lüftermotoren) Vorrang vor der Reduzierung der Trocknungszeit und Verbesserung der Trocknungsqualität gegeben. Im Bereich der Regelungstechnik werden nach wie vor in großem Umfang Sensoren ( $u_{q1}$ -Plättchen) und angepasste Regler (z.B. Zweipunkt-Regler ohne Zeitverhalten) eingesetzt, die ein exaktes Einhalten der durch den Trocknungsplan vorgegebenen Sollwerte erschweren. Im Rahmen eines AIF-Projektes (AIF-Nr. 7794) sind jedoch Mittel und Wege aufgezeigt worden, wie diese Situation ohne großen technischen Aufwand verbessert werden kann (Dreiner und Welling 1992).

Die stürmische Entwicklung im Bereich von modular aufgebauten Mess-, Steuer- und Regelsystemen und der dazugehörigen Computersoftware erlaubt es heute, Systeme zu verwirklichen, die praktisch jeden gewünschten Klimaverlauf in industriellen Anlagen realisieren können.

Regelungsstrategie	Grundlage/Voraussetzungen
Zeitabhängig	Erfahrungswerte
Holzfeuchteabhängig	Feedback, Erfahrungswerte
Modell	Holzeigenschaften, Physik, Trocknungsplan, Statistik
Modell + Holzfeuchte-Messung	Holzeigenschaften, Rheologie
echte Feedbacksysteme	Orientierung an Benchmarks

**Tabelle 1:** Regelungsstrategien für die technische Schnittholztrocknung

### Zusammenhang zwischen Trocknungszeit und Trocknungsqualität

Geringe Trocknungszeiten sind wegen der insgesamt langen Prozessdauer bei der technischen Schnittholztrocknung aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten unbedingt anzustreben, eine Steigerung der Entfeuchtungsgeschwindigkeiten ist aber wegen Riss- und Verschalungsbildung nur bis zu einem gewissen Punkt möglich (Welling und Fortuin 1988). Im klassischen Frischluft/Ablufttrockner wird die Entfeuchtung des Holzes gezielt beeinflusst, indem klimatisierte Luft über die Holzoberfläche geleitet wird. Durch geeignete Wahl von Temperatur und Luftfeuchte kann die Wasserdampfabgabe der Holzoberfläche in Grenzen variiert werden, eine unmittelbare Beeinflussung der Holzfeuchte im Holzinnern ist aber nicht möglich. Die durch das Kammerklima beeinflusste Austrocknung der Oberflächenschichten kann als Triebkraft für die Feuchtebewegungen im Inneren des Holzes verstanden werden. Ausgeprägte Feuchtegradienten über den Brettquerschnitt sind aber auch zu einem großen Teil mitentscheidend für die erzielbare Trocknungsqualität (Verschalung, Rissbildung [Welling 1988]). Die Trocknungsgeschwindigkeit lässt sich durch Anheben der Temperatur zwar in gewissem Umfang beschleunigen, aber auch hier sind wegen Verfärbungsgefahr und anderen Unverträglichkeiten Grenzen gesetzt.

Unter der Voraussetzung, dass durch die Luftzirkulation ein ausreichender Wärmeübergang auf das Holz erfolgt, kann im Frischluft-/Ablufttrockner die Entfeuchtungsrates nur durch Variation von Temperatur, Luftfeuchte und Strömungsgeschwindigkeit gesteuert werden. Aus dem Trocknungsplan erhält das Steuerungssystem für jeden Zeitpunkt bzw. für jede Holzfeuchte Sollwertvorgaben für Klimabedingungen, bei denen keine Schäden am Holz durch zu hohe Temperaturen (Farbe) oder Feuchtegradienten (Trocknungsspannungen) entstehen. Hierbei stützt man sich bisher rein auf Erfahrungswerte, die in Form der bekannten Trocknungspläne vorliegen (Welling 1989). Bisherige Ansätze zur Ablaufoptimierung haben sich ausschließlich auf die Herleitung von Kennziffern beschränkt, die die Ermittlung der zulässigen Klimabedingungen ermöglichen. In der Regel war man dabei bemüht, anhand numerischer Modelle oder anhand messbarer Größen, wie z.B. akustischer Emissionen (Niemz 1988), kontinuierlicher Messung der Holzfeuchteverteilung (Welling 1986 und 1988) oder Deformationen des Holzes (Militzer, Welling 1993), den aktuellen Spannungszustand im Holz zu ermitteln. Da die Feuchteausstauschvorgänge im Holzinneren aber nur mittelbar durch den

zeitlichen Verlauf der Oberflächenfeuchte kontrolliert werden können, sind dabei bisher keine nennenswerte Fortschritte gegenüber der Steuerung nach konventionellen Trocknungsplänen erzielt worden. Problematisch in diesem Zusammenhang ist auch die Tatsache, dass die aus der Vorgeschichte (Vortrocknung) des Holzes resultierenden Einflüsse messtechnisch nicht erfasst werden können (Welling 1990). Bislang hat daher auch keines dieser Verfahren Einzug in die industrielle Trocknungsführung gefunden.

Dem Manko, keinen direkten Einfluss auf das Entfeuchtungsverhalten im Holzinneren nehmen zu können, wurde bisher durch die Entwicklung spezieller Verfahrenskonzepte wie HF-Trocknung, Vakuum-Trocknung oder Heißdampftrocknung begegnet. Die entsprechenden Anlagen sind aber wegen der aufwendigeren Anlagentechnik z.T. deutlich kostenintensiver als klassische Frischluft/Ablufttrockner, was sie möglicherweise für weite Aufgabengebiete ausschließt (Ressel 1993). Eine Modifikation des Frischluft-/Abluft-Verfahrens, die zumindest in Grenzen die Steuerung der Feuchteprofile während der Trocknung ermöglicht, müsste dementsprechend als deutlicher Fortschritt mit entsprechenden wirtschaftlichen Vorteilen für die Betreiber angesehen werden.

### **Einfluss von Wechselklima auf trockenungsrelevante Parameter**

Der Einfluss von wechselnden Klimabedingungen auf das Verhalten von Vollholz und Holzwerkstoffen war in der Vergangenheit Gegenstand einer Vielzahl von Veröffentlichungen (z.B. Wengert 1976, Kolb et al. 1984, Dinwoodie et al. 1990, Martensson 1992, Hanhijärvi 1995). Setzt man Holz oder Holzwerkstoffe einer Biege-, Zug- oder Druckbeanspruchung bei gleichzeitig wechselnden Klimabedingungen aus, zeigt das Material neben den bekannten zeitabhängigen Kriech- und Relaxationsvorgängen einen Effekt, der in der Fachliteratur mit dem Terminus „mechano-sorptive creep“ bezeichnet wird (Ranta-Maunus 1990). Das Kriechverhalten unter wechselnden Klimabedingungen (Temperatur und/oder relative Luftfeuchte) ist gegenüber konstanten Klimabedingungen in starkem Maße erhöht. Bei jeder Trocknung wird die Elastizitätsgrenze des Holzes quer zur Faserrichtung sehr rasch erreicht (Welling 1988). Als Folge davon kommt es im Holz zu plastischen Deformationen, die nach Erreichen der Maximaldehnung zur Rissbildung führen (Moren und Sehstedt-Persson 1992, Joyet et al. 1992). Bei wechselnden Klimabedingungen kann die Maximaldehnung in starkem Maße erhöht werden, was zu einer Verminderung der Rissneigung führt.

Zusätzlich zu diesem Effekt besteht theoretisch die Möglichkeit, die sich im Holz einstellenden Feuchteprofile durch rhythmische Klimawechsel gezielt zu beeinflussen. Betrachtet man z.B. die Holzfeuchteentwicklungen nach einer kurzzeitigen Klimastörung, so ergeben sich wegen der langsamen Feuchtebewegungen für die weiter im Holzinneren liegenden Schichten länger andauernde Änderungen der Holzfeuchte als für oberflächennahe Schichten. Nach einer kurzfristig vorliegenden Luftfeuchteerhöhung lassen sich z.B. auch nach Abklingen der Feuchteanhebung in der Oberflächenschicht noch geringfügig höhere Holzfeuchten im Holzinneren erkennen. Wiederholt man die Störungen mit geeigneter Dauer und Amplitude, ergeben sich im Holzinneren gegenüber Konstantklimabedingungen im zeitlichen Mittel höhere bzw. geringere Holzfeuchten. Schon allein durch die Beeinflussung der Feuchteprofile um wenige Prozentpunkte dürften deutlich verringerte Spannungen und/oder Trocknungszeiten erreichbar sein. Voraussetzung hierfür ist, dass Amplitude und Frequenz der Klimawechsel richtig gewählt werden. Ein zusätzlicher positiver Effekt ergibt sich durch das oben beschriebene, verstärkte mechano-sorptive Kriechen bei zyklischen Feuchte-

änderungen in den Oberflächenschichten. Hierdurch wird die Neigung zur Ausbildung von Oberflächenrissen vermindert. Insbesondere bei der Trocknung von starker Brettware und Kanthölzern mit großen Querschnitten (Bauholz), bei denen die natürliche Schwindungsanisotropie die Ausbildung von Rissen begünstigt (Welling 1993), könnte die Erhöhung der Maximaldehnung in den Oberflächenschichten zu einer entscheidenden Qualitätsverbesserung beitragen.

### **Es ist festzuhalten:**

- Die technische Schnittholz-trocknung ist für Weiterbe- und –verarbeitung vielfach unabdingbar. Sie ist geprägt von langen Trocknungszeiten.
- Üblicherweise in der Praxis verwendete Trocknungsstrategien basieren auf praktischen Erfahrungen und ergänzenden theoretischen Überlegungen.
- Ein Teil der derzeit eingesetzten Sensoren ( $u_{GI}$ - Plättchen) und Regler erschweren ein exaktes Einhalten der durch den Trocknungsplan vorgegebenen Sollwerte.
- Die holzbe- und verarbeitende Industrie stellt steigende Ansprüche an die Trocknungsqualität.
- Der Feuchtegradient während der Trocknung hat entscheidenden Einfluss auf die erzielte Trocknungsqualität und die benötigte Trocknungszeit.
- Bei wechselnden Klimabedingungen kann die Maximaldehnung in starkem Maße erhöht werden („mechano-sorptive creep“), was zu einer Verminderung der Rissneigung führt.
- Durch Wechselklima können im Mittel im Holzinneren geringere Holzfeuchten erzielt werden als bei Konstantklima, so dass eine Verkürzung der Trocknungszeit zu erwarten ist.

## **2 Steuer- und Regeltechnik der Wechselklimatrocknung**

Im Zuge der Projektaktivitäten wurde die Steuerung einer vorhandenen Trocknungsanlage für Versuche im Labor- und Pilotmaßstab auf die Erfordernisse der Trocknung im Wechselklima umgerüstet. Hierzu wurden entsprechende Sensoren installiert und eine Softwaresteuerung programmiert.

Primäre Anforderungen an die Software waren, dass sie sämtliche Variationen der Sollwertvorgaben realisieren sowie durchgeführte Trocknungen zuverlässig und umfassend dokumentieren muss. Des Weiteren sollen sämtliche Programmabläufe dem Benutzer offengelegt werden, wobei auch die Erstellung des Trocknungsplans transparent erfolgt. Das Editieren des Trocknungsplans soll durch eine Lade- und Speicherfunktion deutlich vereinfacht werden. Es soll auch möglich sein, während der Trocknung den Trocknungsplan zu editieren und die Änderungen sofort an die Steuerung zu übergeben. Ergänzend soll es möglich sein, die einzelnen Übertragungsglieder des PID-Regelungssystems zu modifizieren, und somit die Regelung an die thermische und thermodynamische Trägheit des Systems anzupassen.

## 2.1 Aufbau des Mess- und Regelungssystems

### 2.1.1 Meßsystem

Das Meßsystem hat die Aufgabe, die Messgrößen des Prozesses aufzunehmen und in ein elektrisches Messsignal umzuformen. Die bei der Holz Trocknung zu erfassenden Messgrößen sind die Trockentemperatur, Feuchttemperatur und Holzfeuchte. Alle verwendeten Messverfahren sind indirekte Messverfahren. Der gesuchte Messwert wird dabei auf eine andere physikalische Größe zurückgeführt und aus dieser unter Verwendung bekannter physikalischer Zusammenhänge ermittelt.

Die Trocken- und Feuchttemperatur wird durch ein PT100 Widerstandsthermometer erfasst. Bei diesem handelt es sich um ein Widerstandsthermometer mit positivem Temperaturkoeffizient, d.h. dass bei steigender Temperatur der zu messende Widerstand nahezu linear ansteigt. Hierdurch erfolgt eine sehr exakte Berechnung der vorliegenden Temperatur.

Die Holzfeuchte kann auf zwei Arten bestimmt werden. Die erste Möglichkeit ist die Berechnung der Feuchte über eine Widerstandsmessung. Es handelt sich um die klassische Feuchtemessung mittels in das Holz eingebrachter Elektroden. An die Elektroden wird eine Spannung von 4,5 Volt angelegt und der Spannungsabfall gemessen. Aus dem gemessenen Widerstand des Holzes wird unter Verwendung holzartenspezifischer Kennlinien und einer zusätzlichen Temperaturkompensation die momentane Holzfeuchte berechnet. Die zweite Möglichkeit der Holzfeuchtebestimmung erfolgt parallel durch eine kontinuierliche Wägung der Trocknungscharge. Hierbei wird die momentane Holzfeuchte über den Gewichtsverlust aufgrund des Wasserverlustes während der Trocknung berechnet. Dieses Verfahren eignet sich allerdings nur für den Laborbetrieb, da eine Wiegung der gesamten Charge oder eines Teils der Charge unter industriellen Bedingungen nicht durchgeführt werden kann.

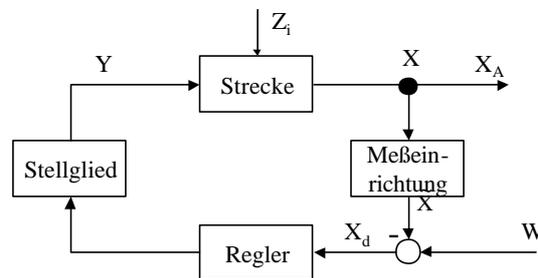
### 2.1.2 Regelungssystem

In einem Regelungssystem erfolgt eine Übertragung und Verarbeitung von Signalen. Aufgabe des Regelungssystems ist das Angleichen der Führungsgrößen (z.B. Temperatur) an direkte und indirekte Sollwertvorgaben. Nach DIN 19226 [2] ist „*Regeln*“ ein Vorgang, bei dem eine Größe, die *Regelgröße*, fortlaufend erfasst (gemessen), mit einer anderen Größe, der *Führungsgröße*, verglichen und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleichs im Sinne der Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Der sich daraus ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem *Regelkreis* statt“.

Die Regelung muss flexibel auf den Einfluss von Störgrößen (z.B. variierende Temperatur) reagieren und das System „ruhig“ halten. Bei stark oszillierenden Sollwertvorgaben ist die Stabilität der Regelung äußerst wichtig. Die Verarbeitung der Messwerte und die daraus berechneten Änderungen der Stellgrößen erfolgt über die Software.

Bei der hier verwendeten Regelung handelt es sich um einen PID Regler. Die einzelnen Glieder des Regelkreises sind in Abbildung 1 dargestellt.

## Regelung



**Abbildung 1:** Komponenten eines Regelkreises nach DIN 19226

$X_A$ Aufgabengröße	Größe, deren gezielte Beeinflussung Aufgabe der Regelung ist, z.B. die Temperatur
$X$ Regelgröße	Größe innerhalb der Regelstrecke, deren Wert (=Istwert) zum Zwecke des Regels erfasst wird
$X_d$ Regeldifferenz	wird durch direktes Ausrechnen bestimmt, $X = W - \tilde{X}$
$W$ Führungsgröße	Größe, der die Aufgabengröße in festgelegtem Zusammenhang folgen soll, z.B. die Temperatur als Sollwert aus dem Trocknungsplan
$Y$ Stellgröße	Größe, durch die die Steuereinrichtung gezielt auf die Strecke einwirkt, z.B. die Stellung der Abluftklappen
$Z_i$ Störgrößen	Größen, die in unbeabsichtigter Weise auf die Strecke wirken, z.B. der Wärmeverlust des Trockners durch die Abluft
Strecke	Die Strecke ist der Trockner inklusive aller zum Betrieb notwendigen Bestandteile
Messeinrichtung	durch die Messeinrichtung wird die Regelgröße erfasst, z.B. ein Thermometer für die Temperaturmessung
Regler	der Regler verarbeitet die Regeldifferenz und reagiert nach den Kennlinien des Regelungssystems auf die Abweichung. Die Reaktionen auf die Abweichungen sind die Vorgaben an das Stellglied. Z.B. die Befehle des Computers an die Module zum Öffnen oder Schließen der Abluftklappen.
Stellglied	z.B. der Klappenmotor oder die Heizstäbe

## 2.2 Komponenten der Trocknungsanlage

Die vorhandene Trocknungsanlage setzt sich aus mehreren Elementen zusammen. Auf der ersten Ebene befindet sich der Computer, auf dem die Software arbeitet. In der nächsten Ebene befinden sich die Mess- und Schaltelemente, die über eine Schnittstelle mit dem Computer verbunden sind. Diese Module sind in der Lage, Messwerte zu erfassen, aufzuarbeiten und als diskrete Werte an den Rechner zu übergeben. Des Weiteren schalten sie direkt die Steuergeräte des Trockners entsprechend den Vorgaben der Software. Die Steuergeräte befinden sich in einem Maschinenschaltschrank. Die Abluftklappe, der Sprühkopf und die Heizelemente sind relaisgeschaltet, die Lüfterleistung ist proportional gesteuert. In der untersten Ebene befindet sich der Trocknungsapparat. Im Trockner wird die Luftfeuchte, die Temperatur sowie die Luftgeschwindigkeit geregelt.

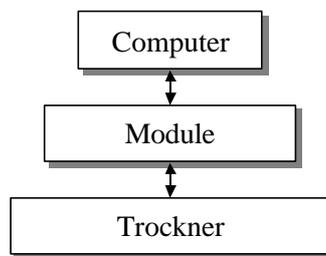


Abbildung 2: Komponenten der Trocknungsanlage

### 2.2.1 Computer

Als Rechner fungiert ein handelsüblicher PC. Mindestanforderung für eine angenehme Handhabung ist ein Pentium I, da recht komplexe Berechnungen durchgeführt werden und das System zeitgetaktet ist. Die Verbindung zur Schnittstelle ist in der Software frei wählbar. Sie wurde hier auf die Com 1 gelegt.

### 2.2.2 Schnittstelle

Bei der Busschnittstelle handelt es sich um eine RS485. Diese arbeitet im Halbduplex-Verfahren. Bei der Datenübertragung im Halbduplex-Verfahren wird eine abgeschirmte Zweidrahtleitung verwendet. Über das gleiche Kabel wird sowohl gesendet als auch empfangen. Die Konzeption der Anlage erfolgte in Anlehnung an eine Industrieanlage. Die Vorteile dieser RS485 Busschnittstelle gegenüber herkömmlichen RS232 Verbindungen liegen in einer höheren Teilnehmerzahl, höheren Übertragungsgeschwindigkeit, größeren Störsicherheit sowie der Möglichkeit lange Übertragungsstrecken zu bewältigen. Dadurch ist es möglich, den PC von der Mess- und Regelungseinheit räumlich zu trennen, ohne auf einen gesicherten Datentransfer zu verzichten.

### 2.2.3 IDM und ISM Module

Die Mess- und Regelungseinheit besteht aus drei Modulen. Es wird ein IDM 118, ein ISM 111 und ein ISM 112 der Firma *Brookhuis* verwendet. Die Module sind so gekoppelt, dass die RS485 Busschnittstelle nur mit dem IDM 118 verbunden ist. Das Signal wird dann intern an die anderen Module weitergegeben.

Das *Intelligent Digital Modul* IDM 118 besitzt zwölf digitale Eingänge und acht digitale Relaisausgänge. 4 digitale Eingänge werden für die Berechnung der Feuchtemessstelle verwendet. 3 Relaisausgänge sind für die Ansteuerung der Heizregister, des Klappenmotors und des Dampfsprühkopfs belegt.

Das *Intelligent Sensor Modul* ISM 112 verfügt über zwei digitale und zwei analoge Ausgänge, sowie vier analoge Eingänge. Über dieses erfolgt die Wägung sowie die Lüfterregelung

Das *Intelligent Sensor Modul* ISM 111 verfügt über vier digitale Ausgänge, sowie vier analoge Eingänge.

Die Besonderheit dieser Module liegt darin, dass die Aufbereitung und Verarbeitung der Messwerte direkt in den Modulen erfolgt. Über die RS485 werden dann nur noch digitale Informationen ausgetauscht. Jedes Modul wird über eine spezielle Software (*IPC 100<sup>TM</sup>*) konfiguriert. Das Modul durchläuft das interne Programm und arbeitet die einzelnen Schritte ab. Nach Messung einzelner Kanäle werden die Messwerte weiter bearbeitet, so wird z.B. aus der Messung eines Widerstandes an einem Messkanal über interne Kennlinien die zugehörige Temperatur errechnet. Ist ein Zyklus abgeschlossen, werden die Ergebnisse dem PC zur Verfügung gestellt. Die Belegung der Ein- und Ausgänge werden in der Software konfiguriert. Das erstellte Softwareprogramm des PC fragt nur noch den diskreten Wert eines Messkanals ab und bekommt diesen übermittelt. Durch diese Trennung der Bearbeitung der Messwerte kommt es zu der gewünschten Stabilität und Fehlersicherheit des gesamten Systems.

Ein weiterer Aspekt bei dem Aufbau der Trocknersteuerung ist die Berechnung der Holzfeuchte inklusive Temperatur- und Holzartenkompensation. In der Konfigurationssoftware des ISM 111 sind die Kennlinien der Holzfeuchtebestimmung nach dem Widerstandsprinzip integriert. Hierdurch wird eine an dem ISM 111-Modul anliegende Spannung von 0 bis 10 Volt in die zugehörige Holzfeuchte umgerechnet. Die Holzartengruppe ist analog den Handmessgeräten frei wählbar. Das System besteht aus einem Widerstandsmessgerät mit integriertem Multiplexer zum Anschluss mehrerer (8, 16) Messstellen. Es ist möglich, mehrere Systeme parallel zu betreiben und somit auf 32, 48, 64 Holzfeuchtemessstellen auszuweiten.

Über die vier digitalen Ausgänge des ISM 111 wird der zu messende Kanal des MUX angewählt. Dabei handelt es sich um ein einfaches 4 Bit System, welches binär die Zahlen 0 bis 15 zuordnet. Die Messung beginnt mit der Wahl eines neuen Kanals der Holzfeuchtemessung. Auf diesem Kanal wird eine gefilterte Messung durchgeführt, wobei ein Mittelwert aus 50 Messwerten gebildet wird. Dadurch wird die elektrische Drift der Messung kompensiert. In diesem Schritt erfolgen gleichzeitig die Temperatur- und Holzartenkompensation. Nach der Messung wird der Holzfeuchtwert an den PC übermittelt; intern wird auf den nächsten Kanal der Holzfeuchtemessung geschaltet. Nun beginnt die Messung von Neuem.

## 2.2.4 Multiplexer MUX

Der Multiplexer ist ein Baustein, der acht bzw. 16 Anschlüsse für Holzfeuchtemessstellen besitzt und diese je nach Vorgabe des ISM 111 durchschaltet. Der gemessene Widerstand wird in eine analoge Spannung umgewandelt, die wiederum an dem ISM anliegt.

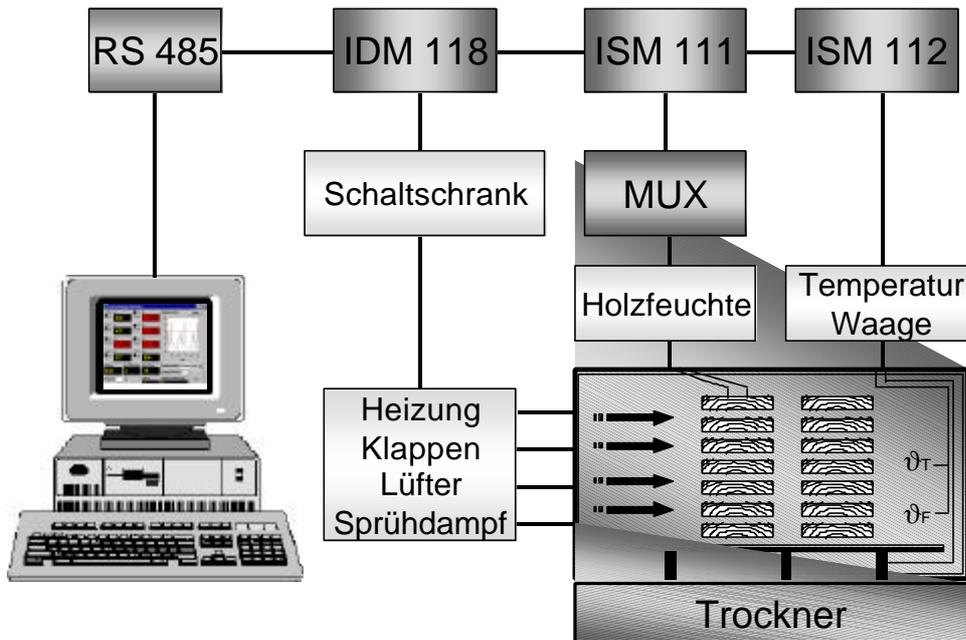


Abbildung 3: Komponenten der Trocknerregelung

## 2.3 Software für die Steuerung und Regelung der Wechselklimatrocknung

### 2.3.1 Testpoint™

Testpoint™ ist eine Programmieroberfläche unter Windows. Testpoint™ beinhaltet Funktionen um Hardwarebausteine anzusteuern und Daten auszutauschen, diese Daten zu verarbeiten, aufzubereiten, darzustellen und zu archivieren. Es ist möglich, eine Oberfläche zu generieren, auf der Daten dargestellt werden und der Benutzer Anweisungen an das Programm geben kann. Die Programmierung erfolgt über die Auswahl miteinander verknüpfter Objekte. Den Objekten können Aktionen zugeordnet werden, welche die Anwendung in der gewünschten Form umsetzt.

Die Programmieroberfläche von Testpoint™ besitzt drei grundlegende Elemente (s. Abbildung 4):

- den *Stock*
- das *Object-Fenster*
- das *Panel-Fenster*

Im Stock sind alle zur Verfügung stehenden Objekte dargestellt. Die Objekte werden mit der Maus ausgewählt und in das Panel-Fenster, oder das Object-Fenster mittels „drag and drop“ gezogen.

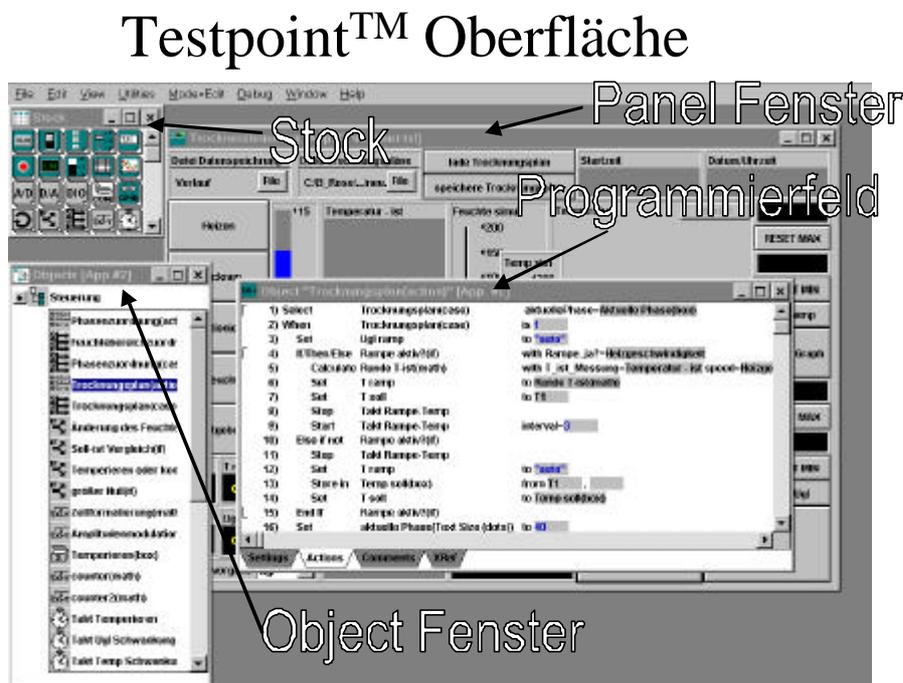


Abbildung 4: Testpoint™: Oberflächenelemente

Im Object-Fenster werden alle verwendeten Objekte angeordnet und können zu Gruppen zusammengefasst werden. Das Gruppieren der Objekte ist äußerst wichtig, da bei einem Programm dieser Größe ansonsten keine Struktur zu erkennen wäre. Den einzelnen Objekten können Namen gegeben werden, wobei zu beachten ist, dass die Objekte nicht über den Namen referenziert, sondern intern zugeordnet werden. Der Name des Objektes sollte daher in direktem Zusammenhang mit der Funktion des Objektes stehen. Ein Teil dieser Objekte sind für den Benutzer verborgen. Diese Objekte dienen der direkten Programmierung und sind z.B. mathematische Funktionen. Der andere Teil der Objekte dient der Visualisierung der Benutzeroberfläche und wird auf dem Panel-Fenster dargestellt.

Im Panel-Fenster sind die Objekte nicht als Icon dargestellt, sondern können von dem Programmierer frei angeordnet und beliebig in der Größe variiert werden. Es ist zwischen interaktiven Objekten (Schalter, Eingabefenster und Regler) sowie rein darstellenden Objekten (Graphen und Anzeigen) zu unterscheiden. Durch die objektgeführte Programmierung können relativ einfach weitere Unterprogramme eingefügt werden, da die Zuweisung der Variablen und Objekte intern erfolgt. So ist es möglich, Erkenntnisse, die während der Versuche gewonnen werden, nachträglich in das Programm einzuarbeiten.

Intern ist das Programm über *Timer* getaktet. Diese Zeitgeber starten in vorgegebenen Intervallen Routinen, die vom Hauptprogramm abgearbeitet werden. So werden z.B. die Messwerte nur sekundlich abgerufen. Dadurch kommt es nicht zu einer Überlastung der Rechenkapazität aufgrund zu vieler Interaktionen mit den ISM und IDM.

Es ist ebenfalls möglich, Routinen ablaufen zu lassen, die den aktuellen Zustand der Trocknung überprüfen. Erst, wenn es zu einer Zustandsänderung kommt, werden Unterroutinen gestartet.

### 2.3.2 Aufbau der Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche der Trocknersteuerung besteht aus einer Hauptoberfläche und weiterer von hier aus aufzurufender Benutzeroberflächen.

Auf der Hauptoberfläche sind alle „Ist-Zustände“, sowie alle aktuellen Sollwertvorgaben angezeigt. Zu den aktuellen Ist-Zuständen zählen die Temperatur, die Holzfeuchte, die Gleichgewichtsfeuchte und das Trocknungsgefälle. Um den zeitlichen Verlauf der Trocknung zu erfassen, wird die Temperatur und die Gleichgewichtsfeuchte zusammen mit den jeweiligen Sollwertvorgaben zusätzlich graphisch dargestellt. Die rechnerischen Abweichungen der Ist-Werte von den Sollwerten können direkt aus Balkendiagrammen abgelesen werden. Des weiteren sind die Aktionen der Regelung (Heizen, Sprühen und Klappenstellung) zu entnehmen.

Von der Hauptoberfläche wird die Trocknung gestartet und notfalls gestoppt. Beim Starten wird die Uhr und Datumsanzeige aktiviert, wodurch der Beginn der Trocknung sowie die aktuellen Daten abzulesen sind. Das Programm ist in der Lage, den Verlauf der Trocknung inklusive aller essentieller Daten kontinuierlich zu speichern. Diese Daten können gegebenenfalls später in Tabellenkalkulationsprogrammen bearbeitet werden. Trocknungspläne können geladen, editiert und gespeichert werden. So wird das Anlegen einer individuellen Datenbank für Trocknungspläne erleichtert.

Durch Buttons auf der Hauptoberfläche können weitere Benutzeroberflächen aufgerufen werden. Hier können die drei Abschnitte des Trocknungsplans (Heizen, Trocknen und Konditionieren), die Holzfeuchtenverwaltung sowie die Zeitgeber aufgerufen und editiert werden.

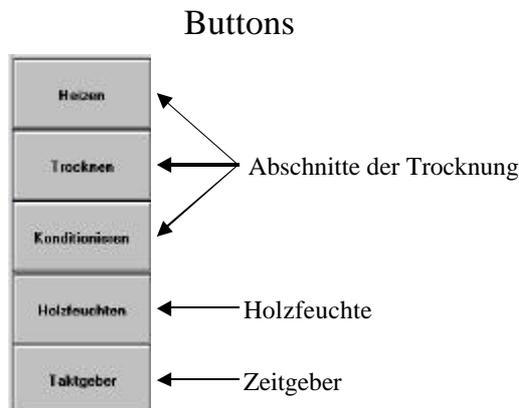


Abbildung 5: Benutzeroberflächen zum editieren und visualisieren von Unterprogrammen

### 2.3.2.1 Trocknungsplan

Um den Trocknungsplan zu editieren, sind die drei Abschnitte der Trocknung separat aufzurufen. Dadurch wird die Eingabe wesentlich einfacher und übersichtlicher. Über den Button *Heizen* wird der erste Abschnitt des Trocknungsplans aufgerufen. In diesem Abschnitt werden die Bedingungen der Aufheizphase und gegebenenfalls der Temperierung vorgegeben.

## Abschnitt 1: Heizen

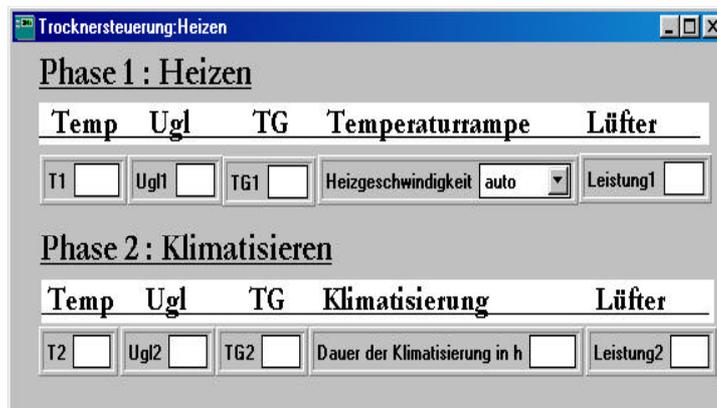


Abbildung 6: Benutzeroberfläche Trocknung, Abschnitt Heizen

### Phase 1: Aufheizen

#### Vorzugebende Sollwerte:

- Temperatur
- Temperaturrampe
- $U_{gl}$
- Lüfterleistung

Die Temperaturrampe gibt die Aufheizgeschwindigkeit vor und ist vor allem während des Aufheizevorganges wichtig. Um die vorgegebene Luftfeuchtigkeit einzustellen, wird Dampf oder Wasser in die Trockenkammer gesprüht. Ist die Innentemperatur des Trockners deutlich höher als die Temperatur der Mantelung des Trockners, so kondensiert der Wasserdampf an den Wänden. Dies hat zwei negative Effekte. Zum einen hat das System Probleme die vorgegebene Luftfeuchtigkeit zu erreichen, was gleichbedeutend mit einer scharfen Trocknung ist, so dass es schon während des Aufheizens zu Schäden am Schnittholz kommen kann; zum anderen wird viel Energie für die Wasserdampferzeugung verbraucht, und es treten Korrosionserscheinungen im Trockner auf. Durch die gesteuerte Erwärmung wird dem gesamten System Zeit gegeben sich gleichmäßig zu erwärmen, so dass die geschilderten Probleme nicht auftreten.

## Phase 2: Durchwärmen

### Vorzugebender Sollwert:

- Dauer

Um ein gleichmäßiges Temperaturprofil über den Brettquerschnitt zu erreichen, besteht die Möglichkeit die Temperatur und das  $u_{gl}$  im Trockner für eine bestimmte Zeit auf einem vorgegebenen Niveau zu halten. Die Dauer dieser Durchwärmungsphase ist frei zu wählen. Bei Trocknungsanlagen mit hohem Fassungsvermögen ist eine vollständige Aus- und Durchwärmung der Charge nur mit einer ausreichend langen Durchwärmphase zu erreichen. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen im Stapel kommt es ansonsten zu einer inhomogenen Trocknung. Ist die Zieltemperatur erreicht und die Durchwärmung abgeschlossen, wechselt das Programm in den zweiten Abschnitt, der eigentlichen Trocknung des Holzes auf die Zielfeuchte.

## Phase 3: Trocknung

### Vorzugebende Sollwerte:

- Temperatur,
- $u_{gl}$  (oder alternativ das TG),
- Phasenlänge und Amplitude des Wechselklimas
- Lüfterleistung

Den eigentlichen Trocknungsplan erreicht man über den Button *Trocknung*. Maßgeblich für die einzelnen Abschnitte der Trocknung ist die Holzfeuchte. Die Holzfeuchte ist in zehn Bereiche gegliedert.

## Abschnitt 2: Trocknung

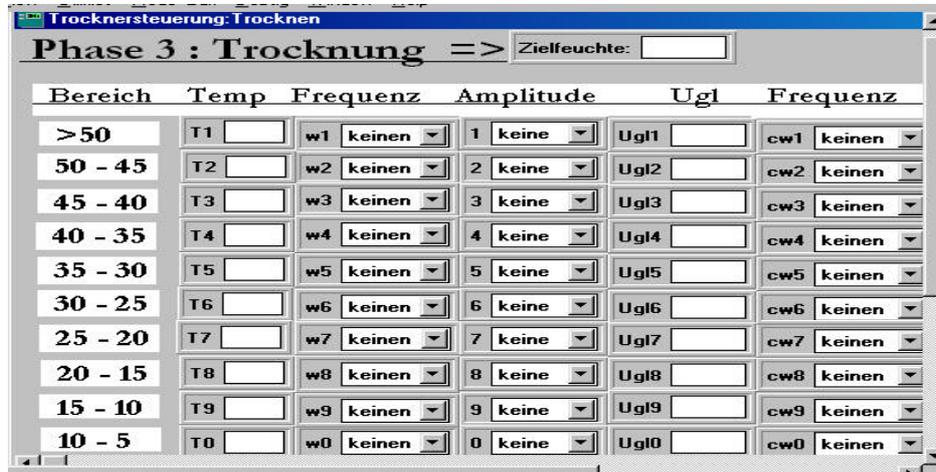


Abbildung 7: Benutzeroberfläche Trocknung, Abschnitt Trocknung

Beginnend mit einer Feuchte größer 50%, sind die nachfolgenden Bereiche abwärts zählend in 5% Schritten gegliedert. Abgeschlossen wird die Trocknungsphase, wenn die eingegebene Zielfeuchte erreicht ist. Entscheidend für diesen Abschnitt ist, dass anders als bei konventionellen Trocknungsprogrammen hier für jedes Holzfeuchteintervall über die Sollwerte für Temperatur und  $u_{gl}$  gezielte Schwankungen gelegt werden können, um Wechselklimabedingungen zu erzeugen.

Das Wechselklima der Trocknung wird durch Schwankungen der Sollwertvorgaben erzeugt. Die Amplitude der Schwankung ist für jeden Bereich der Holzfeuchte in absoluten Zahlen über pull down Menüs separat auszuwählen. So kann eine Temperaturschwankung von z.B. +/- 2°C um den Sollwert eingestellt werden. Die Frequenz der Schwankungen ist ebenfalls über pull down Menüs auszuwählen. Je nach anzustrebender Geschwindigkeit kann eine Frequenz gewählt werden. Die Frequenz kann in 0,5 Stundenintervallen verändert werden.

Alternativ zum  $u_{gl}$  kann das TG als Führungsgröße dienen. Auch hier kann das Wechselklima in gleicher Weise erzeugt werden.

Nachdem die Zielfeuchte erreicht ist, wechselt das Programm in den letzten Abschnitt der Trocknung.

### Phase 4: Konditionierung

#### Vorzugebende Sollwerte:

- Temperatur
- $u_{gl}$
- Dauer
- Lüfterleistung

In diesem Abschnitt kann eine inhomogene Verteilung der Feuchte über den Brettquerschnitt und innerhalb der Charge erreicht werden sowie während der Trocknung entstandene Spannungen abgebaut werden.

### Phase 5: Abkühlen

Vorzugebender Sollwert:

- Temperatur
- $u_{gl}$
- Temperaturrampe
- Lüfterleistung

Damit das Holz bei der Entnahme aus dem Trockner keine Oberflächenrisse bekommt, muss es am Ende des Trocknungsprozesses an die Umgebungstemperatur angeglichen werden. Wird es mit zu hoher Temperatur Zustand entnommen, kann die Oberfläche an der trockenen Umgebungsluft über trocknen. Um die Luftfeuchtigkeit der Sollwertvorgabe entsprechen einzustellen, kann die Abkühlgeschwindigkeit durch eine Temperaturrampe verzögert werden. Dadurch wird ein kontrolliertes Abkühlverhalten der Anlage ermöglicht.

## Abschnitt 3: Konditionieren



Abbildung 8: Benutzeroberfläche Trocknung, Abschnitt Konditionieren

Nach Durchlauf der drei Programmabschnitte des Trocknungsplans inaktiviert das Programm sämtliche Trocknerfunktionen und schaltet sich in einen Wartemodus.

### 2.3.2.2 Holzfeuchte

Die Oberfläche für die Erfassung und Bearbeitung der Holzfeuchten ist über den Button *Holzfeuchte* zu erreichen. Die Benutzeroberfläche bietet die Möglichkeit, aus allen angeschlossenen Messstellen die jeweils relevanten auszuwählen und bei der Bildung des Mittelwertes der gemessenen Holzfeuchte zu berücksichtigen. Stark vom Mittelwert abweichende Werte können hierbei aus der Mittelwertbildung herausgenommen werden. Auf dieser Oberfläche wird außerdem festgelegt, ob die

Regelung der Trocknung auf Basis der Holzfeuchtebestimmung nach dem Widerstandsmessprinzip oder der kontinuierlichen Wägung der Trocknungscharge basieren soll. Die Auswahl erfolgt über pull down Menü und kann im Verlauf der Trocknung jederzeit geändert werden.

Die Holzfeuchten der einzelnen Messstellen sind jeweils in einem eigenen Display angezeigt und können durch einen Button für die Berechnung des Mittelwertes der Holzfeuchte aktiviert oder inaktiviert werden. Zusätzlich zum Mittelwert der Holzfeuchte zeigt eine Grafik die Werte sämtlicher Holzfeuchtemessstellen an. Hierdurch werden die Schwankungen der Einzelwerte um den Mittelwert veranschaulicht.

Wird die Holzfeuchte über die Gewichtsabnahme berechnet, so ist die Waage zu Beginn des Trocknungsprozesses auf das Nettogewicht der Charge (ohne Wagen und Stapelleisten) einzustellen (*tara*). Aus der zuvor mittels Probenahme und Darmmethode ermittelten Anfangsfeuchte und dem Gewichtsverlust während der Trocknung errechnet sich die Momentanfeuchte der Charge über die Formel:

$$u_F = \frac{m_F}{m_A} (u_A + 100) - 100\%$$

$$u_F = \text{aktuelle Holzfeuchte} \quad u_A = \text{Anfangsfeuchte}$$

$$m_F = \text{aktuelles Gewicht} \quad m_A = \text{Anfangsgewicht}$$

## Holzfeuchte

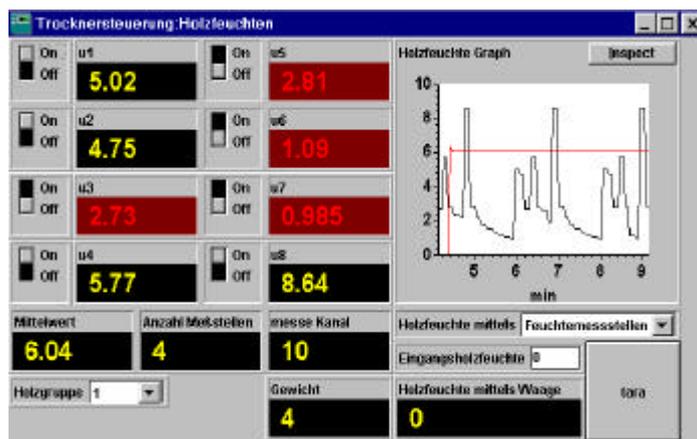


Abbildung 9: Benutzeroberfläche Holzfeuchte

### 2.3.2.3 Taktgeber

Das Programm bietet die Möglichkeit, die Frequenz des Regeltaktes und der Aktualisierung der Messwerte festzulegen. So kann die Regelung und vor allem die graphische Darstellung des

Trocknungsverlaufs bei sehr langen Trocknungen an die Geschwindigkeit der Zustandsänderung angepasst werden.

### 2.3.3 Elementare Programmbausteine

Das Programm setzt sich aus einer Vielzahl von Unterroutinen zusammen. Der Datenfluss erstreckt sich über mehrere hierarchische Ebenen. Primär ist die Interaktion mit den ISM und IDM Modulen. Auf diesem Weg werden Informationen ausgetauscht. Es handelt sich hierbei um Temperatur, Holzfeuchten und Gewicht. Diese Daten werden entweder direkt als Ist-Größen verwendet, oder sie dienen zur Berechnung anderer Prozessgrößen. Die Programmbestandteile der nächsten Ebene dienen der Visualisierung, der Datenbewertung und der Datenverwaltung.

Die Informationen aus der Interaktion mit den Modulen werden vom Programm in dieser Ebene ausgewertet und in Steuerungsbefehle für die Module umgesetzt. Auf der untersten Ebene befinden sich die Routinen, auf die das Programm für die Berechnung der einzelnen Prozessparameter zurückgreift. Dazu zählen die Funktionen der Thermodynamik, der Kanalberechnung, der Vektorzuweisung und der Regelung.

### 2.3.4 Messung der Führungsgrößen

Die Führungsgrößen (Temperatur, aktuelle Holzfeuchte) erhält das Programm über eine DLL Unterroutine. Diese DLL (*Direct Link Libery*) setzt die Befehle von Testpoint™ in Befehle im PROFIBUS-Format um. Das PROFIBUS-Format ist ein Format, in dem die Daten über den Bus (es wurde Com1 als Schnittstelle gewählt) ausgegeben werden. Durch diese Umsetzung kann Testpoint™ mit den Modulen kommunizieren. Die Unterroutine Profibus™ wird über den Befehl *call* aufgerufen. Um z.B. den momentanen Wert der Temperatur zu erhalten, wird folgende Programmzeile benötigt:

1) Call	Messen(GETKANALREAL)	with 13	,4	,Temperatur - ist
2) Call	Messen(GETKANALREAL)	with 12	,2	,Feuchttemperatur

Call ist der Befehl mit dem das Objekt „Messen(GETKANALREAL)“ aufgerufen wird. Dieses Objekt verweist auf die DLL Unterroutine. Die drei Felder, die sich an den Objektnamen anschließen, parametrieren die Unterroutine, d.h. sie werden an die Unterroutine übergeben. Feld eins ist die Bausteinadresse, Feld zwei ist die Speicheradresse des Bausteins und im dritten Feld steht das Objekt, an das der Wert der Speicheradresse gegeben werden soll. Die Zeile „with 13, 4, Temperatur – ist“ bedeutet, dass der Baustein mit der Adresse 13 angesprochen, der Wert des Kanals 4 ausgelesen und an das Testpoint™ - Objekt mit dem Namen „Temperatur – ist“ übermittelt werden soll. Der Datenaustausch erfolgt jedes mal, wenn diese Programmzeile aufgerufen und der neue Wert der Temperatur eingelesen wird. Nach der gleichen Vorgehensweise werden auch die anderen Daten eingelesen.

### 2.3.5 Verarbeitung der Führungsgrößen

Die so übermittelten Daten können entweder direkt visualisiert und für den Prozess verwendet werden, oder sie dienen der Berechnung anderer Größen. Die Luftfeuchtigkeit z.B. wird aus der Troc??ken- und der Feuchttemperatur bestimmt. Aus der Luftfeuchtigkeit lässt sich dann die Gleichgewichtsfeuchte berechnen. Intern sind alle eingelesenen Daten Variablen oder Objekten zugeordnet, auf die die verschiedenen Unterroutinen zugreifen. D.h., alle Variablen im Programm sind globale Variablen.

### 2.3.6 Regelung

Die Regelung versucht die Ist-Zustände der Regelgrößen an die Sollwertvorgaben anzupassen. Die Regelung erfolgt kontinuierlich über den gesamten Verlauf der Trocknung. Die Sollwerte hingegen ändern sich während der Trocknung, je nach Abschnitt der Trocknung. Das Programm hat also die Aufgabe den aktuellen Zustand zu ermitteln, die Sollwerte dem Trocknungsplan entsprechend vorzugeben und die Ist-Werte an die Sollwerte anzugleichen (Abbildung 10).

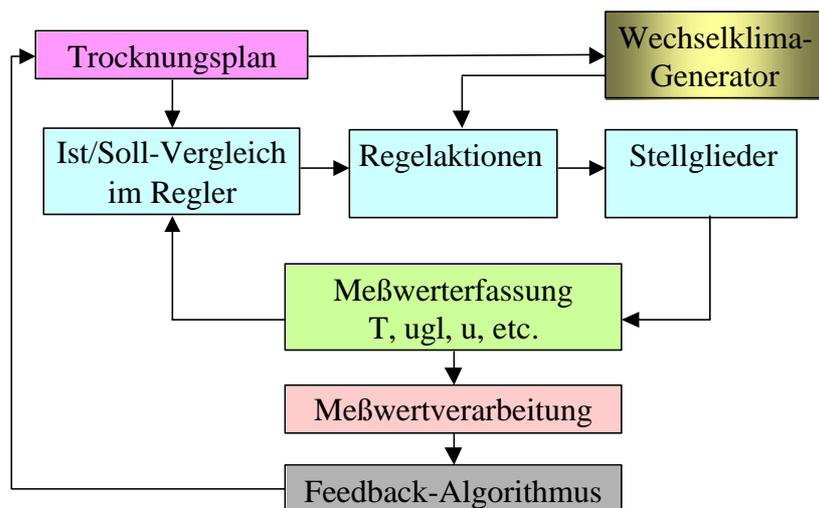


Abbildung 10: Ebenen der Prozessführung einer Trocknung durch Wechselklima

Zu Beginn der Trocknung ist ein Trocknungsplan einzugeben, oder ein vorhandener Trocknungsplan aus der Datenbank einzulesen. Nachdem alle Parameter editiert wurden und die Feuchtemessstellen angeschlossen sind, kann die Trocknung gestartet werden. Das Programm arbeitet dann den Trocknungsplan ab. Wird die für den momentanen Abschnitt gesetzte Zielgröße erreicht, wechselt das Programm in den nächsten Abschnitt bzw. Phase.

#### Phase 1: Heizen

Diese Phase ist abgeschlossen, wenn die Zieltemperatur erreicht ist.

#### Phase 2: Konditionieren

Ist eine Konditionierungsdauer vorgegeben, so verweilt das Programm über die angegebene Dauer unter den angegebenen Bedingungen.

#### Phase 3: Trocknung

Die maßgebliche Größe dieses Abschnittes ist nicht die Temperatur, sondern die Holzfeuchte. Der Trocknung entsprechend nimmt die Holzfeuchte ab. Unterschreitet die aktuelle Holzfeuchte die Endbedingung einer Trocknungsprogrammstufe, wechselt die Sollwertvorgabe zur nächsten Stufe. Ein Rücksprung in einen höheren Abschnitt kann nicht automatisch erfolgen. Hierfür ist ein manueller Eingriff erforderlich. Die Trocknungsphase ist abgeschlossen, wenn die Zielfeuchte erreicht ist.

#### Phase 4: Konditionieren

Um die während der Trocknung zwangsläufig auftretende Übertrocknung der Holzoberfläche zu reversieren und Trocknungsspannungen abzubauen, kann die Trocknungscharge bei möglichst hohem Temperaturniveau über einen vorgegebenen Zeitraum bei hoher relativer Luftfeuchte konditioniert werden. Die maßgebliche Größe dieses Abschnittes ist die Verweildauer.

#### Phase 5: Abkühlung

Um Trocknungsschäden im letzten Abschnitt des Prozesses zu verhindern kann eine gesteuerte Abkühlung auf eine Zieltemperatur erfolgen. Die Dauer der Abkühlung ist über eine Temperaturrampe zu regulieren.

Während der gesamten Trocknung ist eine Kontrollroutine aktiv. Diese prüft im Sekundentakt den aktuellen Zustand. Erst wenn sich der Zustand ändert, werden von dieser Routine aus die anderen Routinen gestartet. Damit sind alle Sicherheitsabfragen auf eine Routine konzentriert und können leicht den Vorgaben des Benutzers angepasst werden.

Des Weiteren ist die Regelung über die gesamte Trocknung aktiv. Sie vergleicht die einzelnen Größen miteinander. Bei dieser Regelung handelt es sich um eine PID-Regelung.

### 3 Regelalgorhythmus

Die Umsetzung des Eingangssignals  $x$  erfolgt zu Zeitpunkten, die jeweils um die Abtastzeit  $T_a$  auseinander liegen. Es werden Messwerte zu den Zeiten  $t_1, t_2, \dots, t_n$  ermittelt. Der augenblickliche Zeitpunkt wird als  $t_n$  bezeichnet. Damit ist  $t_n$  der letzte Zeitpunkt, zu dem die Regelgröße gemessen wurde. Über die weiteren Zeitpunkte  $t_{n+1}, t_{n+2}, \dots$  liegen noch keine Informationen vor. Die Aufgabe besteht jetzt darin, aus den bekannten Messwerten  $\dots, t_{n-2}, t_{n-1}, t_n$  die notwendige Änderung der Stellgröße  $y$  zu berechnen.

Bei einem PID-Regler setzt sich die Stellgröße  $y$  aus drei Anteilen zusammen.

- P-Anteil:  
der Proportional-Anteil ist proportional zur Regeldifferenz  $e$ .
- I-Anteil:  
der Integralanteil-Anteil ist proportional der Summe aller Regelabweichungen über die Zeit.
- D-Anteil:  
der Differential-Anteil ist proportional der Änderungsgeschwindigkeit des Eingangssignals  $x$ .

Die drei Komponenten werden linear zum Gesamtregler zusammengefügt, so dass sich die Stellgröße  $y$  aus der Summe der PID-Anteile ergibt. Die einzelnen Anteile an der Stellgröße  $y$  berechnen sich nach folgenden Gleichungen:

**P-Anteil:**

$$Y_n = K_{PR} \cdot (w_n - x_n) = K_{PR} \cdot e_n \quad (1)$$

$K_{PR}$  ist der konstante Übertragungsbeiwert des P-Reglers. Die Regeldifferenz  $e$  berechnet sich aus der Differenz von Führungsgröße  $w$  und Regelgröße  $x$  im Zeitpunkt  $n$ .

**I-Anteil:**

$$Y_n = Y_{n-1} + K_{IR} \cdot T_a \cdot e_n \quad (2)$$

$K_{IR}$  ist der konstante Übertragungsbeiwert des I-Reglers.

**D-Anteil:**

$$Y_n = K_{DR} \cdot (e_n - e_{n-1}) / T_a \quad (3)$$

$K_{DR}$  ist der konstante Übertragungsbeiwert des D-Reglers.

Diese Funktion ergibt bei einer sprunghaften Änderung der Regeldifferenz eine Nadelfunktion als Antwort. Da dieses Verhalten nicht gewünscht ist, wird die Antwort auf eine sprunghaften Änderung durch die Zeitkonstante  $T_D$  verzögert und somit gedämpft. Die Gleichung einer gedämpften D-Antwort lautet:

$$Y_D = K_{DR} \cdot \Delta x \cdot e^{-t/T_D} \quad (4)$$

Zur Verdeutlichung der Wirkungsweise der Gleichungen können diese in einem Diagramm über die Zeit abgetragen werden. Die oberen Graphen in der Abbildung 10 und Abbildung 11 beschreiben die Änderung des Eingangssignals  $x$  um  $\Delta x$ , die unteren Graphen das Antwortverhalten des jeweiligen Anteils des Reglers (P, I und D) auf die Änderung des Eingangssignals.

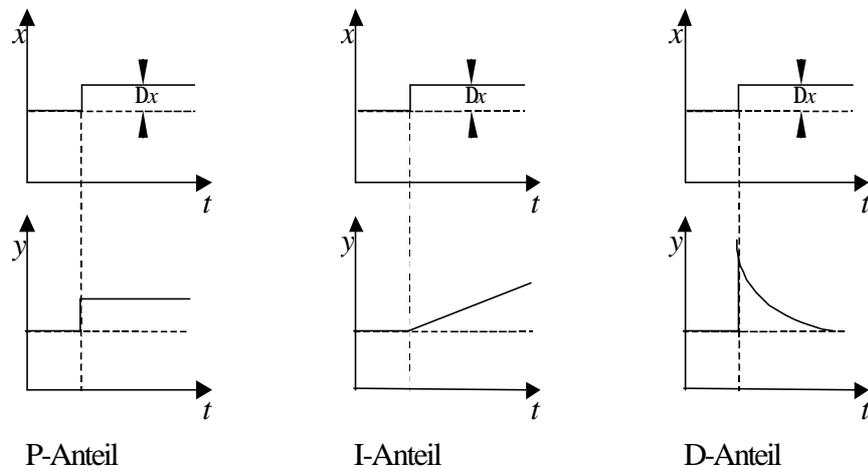


Abbildung 11: Antwortverhalten des P-, I-, D-Anteils

Durch die Addition der einzelnen Anteile des Reglers errechnet sich die Gesamtänderung der Stellgröße  $y$ . Wird die Gesamtänderung über die Zeit abgetragen, ergibt sich hieraus folgendes Diagramm:

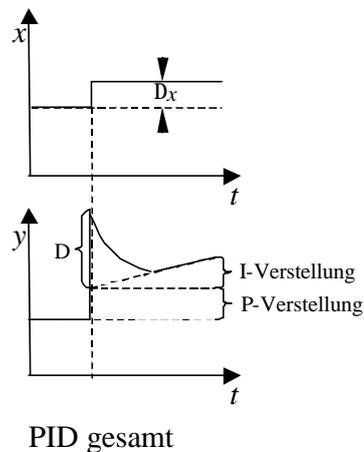


Abbildung 12: Antwortverhalten des gesamten PID-Reglers

Da für die einzelnen Regler nicht die Proportionalbeiwerte  $K_{IR}$  und  $K_{DR}$  angegeben sind, werden diese in den Proportionalbeiwert  $K_{PR}$  unter Zuhilfenahme der Nachstellzeit  $T_n$  und der Vorstellzeit  $T_v$  umgerechnet. Dadurch ergibt sich nach SAMAL und BECKER (1993) die Gleichung:

$$Y_n = Y_{n-1} + c_0 \cdot e_n + c_1 \cdot e_{n-1} + c_2 \cdot e_{n-2} \quad (5)$$

mit:

$$\begin{aligned} c_0 &= +K_{PR} \cdot (1 + T_a/2 \cdot T_n + T_v/T_a) \\ c_1 &= -K_{PR} \cdot (1 - T_a/2 \cdot T_n + 2T_v/T_a) \\ c_2 &= +K_{PR} \cdot (T_v/T_a) \end{aligned} \quad (6)$$

Bei der für die **Trocknerregelung** verwendeten Gleichung handelt es sich jedoch nicht um eine zusammengefasste Gleichung. Die einzelnen Glieder können im Zuge einer manuellen Optimierung separat verstärkt werden. Die von DREINER (1992) entworfene Gleichung lautet:

$$Y_n = e_n \cdot P + ((Y_{In-1} + 0.2 \cdot e_n) - 20; +20) \cdot I + \left( Y_{Dn-1} \cdot \frac{5}{6} + \frac{1}{6} \cdot (e_n - e_{n-1}) \right) \cdot D \quad (7)$$

Die Größen P, I, und D verstärken linear die jeweiligen Anteile des PID-Reglers. Der I-Anteil setzt sich aus der Stellgröße  $Y_{n-1}$  und der gedämpften Regelabweichung  $e_n$  (Faktor 0.2) zusammen. Der Wert der neuen Stellgröße  $Y_{In}$  wird durch ein Cliprange<sup>1</sup> von +20/-20 begrenzt. Der D-Anteil an der Stellgröße  $Y_n$  errechnet sich aus der Stellgröße  $Y_{Dn-1}$  und der Differenz  $e_n - e_{n-1}$ . Die Gewichtung der Stellgröße  $Y_{Dn-1}$  (mit 5/6) und der Differenz  $e_n - e_{n-1}$  (mit 1/6) ist erforderlich, damit sich das gewünschte Abklingverhalten einstellt.

---

<sup>1</sup> Werte, die außerhalb der Grenze eines Bereiches (hier von -20 bis 20) liegen, werden durch die Grenzen ersetzt.

## 4 Auswirkung der Klimabedingungen auf die Trocknung

Die direkt einzustellenden Parameter, aus denen sich die Klimabedingungen im Trockner zusammensetzen, sind :

- Temperatur
- Luftfeuchte
- Luftgeschwindigkeit

Hinzu kommt, dass durch künstlich generierte Schwankungen der Temperatur und der Luftfeuchte ein Wechselklima erzeugt werden kann. Die Auswirkung dieser einzelnen Parameter auf die Vorgänge im Holz und damit auf die gesamte Trocknung werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

### 4.1 Temperatur

Die Temperatur wirkt sich auf alle Vorgänge und Mechanismen, die während der Trocknung ablaufen, aus. Dadurch ist die Temperatur ein entscheidender Faktor für die Trocknungsgeschwindigkeit und die Qualität des Endproduktes. Folgende Zustände des Holzes und Mechanismen, die im Holz während der Trocknung ablaufen, werden durch die Temperatur beeinflusst.

#### 4.1.1 Feuchtetransport

Die Beeinflussung der Geschwindigkeit des Feuchtetransports hat, je nach Mechanismus, mehrere Faktoren:

##### Gebundenes Wasser

Die transversale Diffusionsgeschwindigkeit des gebundenen Wassers innerhalb der Zellwand wird durch folgende Gleichung (SIAU 1984) beschrieben:

$$D_{BT} = 0,07 \cdot e^{\left[ -\frac{(2197-17 \cdot u) \cdot J}{R \cdot T \cdot mol} \right]} \quad (8)$$

Eine Temperaturerhöhung bewirkt eine Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit. Die idealisierte Gleichung gilt für einen Holzfeuchtebereich von 5 % bis 25 %. Für das Verhältnis zwischen transversaler und longitudinaler Diffusion innerhalb der Zellwand gilt der Zusammenhang (SIAU 1984)

:

$$D_{BL} = 2,5 \cdot D_{BT} \quad (9)$$

### Freies Wasser

Bei steigender Temperatur nimmt die Viskosität des Wassers ab. Dadurch wird der Massenstrom erhöht. Für die Viskosität eines Fluids gilt:

$$h = A \cdot e^{\frac{B}{T+C}} \Rightarrow h = f(T) \quad (10)$$

mit A, B und C als Materialkonstanten.

### Wasserdampf

Mit steigender Temperatur steigt der Sättigungsdampfdruck des Wassers. In der Luft über der Wasseroberfläche liegt ein geringerer Wasserdampfpartialdruck vor, wodurch ein Partialdruckunterschied zwischen Wasseroberfläche und Luft entsteht. Zusätzlich ist das Wasserdampf/Luftgemisch bei höheren Temperaturen in der Lage, mehr Wasserdampf aufzunehmen. Mit steigender Temperatur steigt die Diffusionsgeschwindigkeit des Wasserdampfes im Holz aufgrund der erhöhten Reaktionskinetik der Wassermoleküle an.

Durch eine Temperaturerhöhung wird somit der gesamte Feuchtetransport beschleunigt.

#### **4.1.2 Gleichgewichtsfeuchte**

Das Holzfeuchtegleichgewicht nimmt bei konstanter relativer Luftfeuchte mit steigender Temperatur ab. Bei konstanter Temperatur erniedrigt sich das Holzfeuchtegleichgewicht mit fallender relativer Luftfeuchte. Diese Zusammenhänge werden durch Sorptionsisothermen dargestellt, die entweder für Adsorption oder Desorption gelten. Die Fasersättigungsfeuchte nimmt bei steigender Temperatur um ca. 0,1 %/°C ab (SIAU 1984). Grund hierfür ist die steigende Reaktionskinetik der Wassermoleküle sowie der Kettenmoleküle der Cellulose und Hemicellulose. Die Sorptionsenergie setzt sich aus der Summe der Bindungsenergien zwischen dem Wasser und den Hydroxylgruppen der Cellulose und Hemicellulose zusammen. Der Anteil an Wasserstoffbrückenbindungen, Dipolkräften und *van der Waal'schen* Kräften bestimmt die Höhe der Bindungsenergie. Wird das Energiepotential der Wassermoleküle durch die Temperatursteigerung angehoben, geht der Teil der Wassermoleküle in die Dampfphase über, dessen Energiepotential über der Bindungsenergie des im Holz gebundenen Wassers liegt (PIZZI, EATON und BARISKA 1987). Bei unveränderter relativer Luftfeuchte und steigender Temperatur nimmt die Gleichgewichtsfeuchte somit ab.

#### **4.1.3 Festigkeit**

Die Temperatur beeinflusst die elastischen Eigenschaften nicht nur durch die mit der thermischen Expansion verbundenen Gitteränderungen sondern auch durch die molekulare Wärmebewegung. Nach KOLLMANN (1951). Durch die erhöhte Wärmebewegung der Moleküle wird die Bindungskraft der Nebervalenzbindungen geschwächt, wodurch die Festigkeit des Holzes abnimmt. Nach GERHARDS (1982) hat die Temperatur einen deutlichen Einfluss auf Zugfestigkeit und Druckfestigkeit. Zusätzlich

muss jedoch der kumulative Einfluss der Feuchtigkeit auf die Minderung der Festigkeit beachtet werden.

Die Tabelle 2 dargestellten Daten zum Temperatureinfluss auf die Festigkeiten sind gemittelte Werte aus einer Vielzahl von Untersuchungen an diversen Holzarten. Sie dienen lediglich einer Verdeutlichung der Größenordnung des Einflusses. Insgesamt hat eine Temperaturerhöhung einen größeren Einfluss auf die Druckfestigkeit als auf die Zugfestigkeit (GERHARDS 1982).

Die Festigkeit wird bei einer Temperatursteigerung von 20°C auf 50°C in Abhängigkeit von der Feuchte folgendermaßen beeinflusst:

	Feuchtebereich	relative Änderung der Festigkeit bei Steigerung der Temperatur von 20°C auf 50°C
<b>Zugfestigkeit</b>		
parallel zur Faser	12 %	- 4 %
quer zur Faser	11 % - 16 %	- 20 %
quer zur Faser	> 18 %	- 30 %
<b>Druckfestigkeit</b>		
parallel zur Faser	12 % - 45 %	- 25 %
quer zur Faser	> 10 %	- 35 %

**Tabelle 2:** Einfluß der Temperatur auf die Festigkeiten (GERHARDS 1982)

#### 4.1.4 Spannungen

Trocknungsspannungen sind durch den Trocknungsvorgang (Schwindung) induzierte Eigenspannungen innerhalb des Holzes. Sie entstehen durch eine Behinderung der schwindungsbedingten Deformation. Durch die anisotropen Eigenschaften des Holzes entstehen unterschiedliche Spannungszustände in den drei anatomischen Richtungen. Während der Trocknung des Holzes durchlaufen die einzelnen Bereiche des zu trocknenden Gutes unterschiedliche Spannungszustände. Zu Beginn der Trocknung kommt es aufgrund der Schwindung zu Zugspannungen innerhalb der Oberflächenschichten. Die lokalen Zugspannungen können hierbei soweit ansteigen, dass es zu einer Deformation der Oberflächenschichten im plastischen Bereich kommt. Diese Deformationen sind irreversibel. Im weiteren Verlauf der Trocknung beginnen die inneren Bereiche des Holzes aufgrund der verringerten Holzfeuchte ebenfalls zu schwinden. Diese Schwindung wird durch die starren Oberflächenschichten behindert. Es kommt zu einer Spannungsumkehr über den Brettquerschnitt (WELLING 1987). Um die trocknungsbedingten Eigenspannungen des Holzes zu reduzieren, müssen die Zugspannungen, deren Maxima im ersten Drittel der Trocknung liegen, minimiert werden.

Bei der Erwärmung des Holzes kommt es zur Abnahme des E-Moduls. Dieses bedeutet, dass bei unveränderter Dimension des Holzes unter Verringerung des E-Moduls die Spannungen abnehmen. Es kommt zu einem Spannungsabbau in der Zellwand infolge erleichterter Platzwechselforgänge auf molekularer Ebene (KOLLMANN 1952).

Die Spannungsentwicklung im Holz während der Trocknung erstreckt sich über vergleichsweise lange Zeiträume, was zur Folge hat, dass sich die Spannungen entsprechend der visko-elastischen und rheologischen Eigenschaften des Holzes (die wiederum temperatur- und holzfeuchteabhängig sind) abbauen können. Dies geht einher mit einer inneren Materialdehnung<sup>2</sup>, die gegenüber der Schwindung ein umgekehrtes Vorzeichen hat (viscoelastische bzw. plastische Deformation). Je höher die gewählte Trocknungstemperatur und je höher der lokale Feuchtegehalt ist, desto größer ist das Potential für solche inneren Materialdehnungen.

Bei zeitlich veränderlichen Feuchte- und Temperaturzuständen, z.B. bedingt durch Wechselklimabedingungen, wird die visko-elastische/plastische Materialdehnung von einer mechano-sorptiven Materialdehnung überlagert, was gleichbedeutend mit einer Erhöhung der inneren Materialdehnung oder einer Reduzierung der Spannung ist. Durch Wechselklimabedingungen kann deshalb die Spannungsentwicklung im Holz gezielt beeinflusst werden.

#### 4.1.5 Trocknungsfehler

Trocknungsfehler sind Schäden am Holz, die durch eine unsachgemäße Trocknung des Holzes entstehen (WELLING 1994). Trocknungsfehler mindern den Wert des Holzes und können so gravierend sein, dass das Holz nicht mehr verwendbar ist.

Je nach zu trocknendem Gut müssen die Temperaturbedingungen sehr genau eingehalten werden. Sehr problematisch ist die Bildung von Oberflächenrissen und Innenrissen. Vor allem im Bereich hoher Holzfeuchte wird durch die Temperaturerhöhung die Festigkeiten gemindert und das plastische Verhalten des Holzes verstärkt. Aufgrund des gesteigerten plastischen Verhaltens begünstigt stark anisotrope Schwindung Verformungen. Wenn die inneren Spannungen aufgrund der Schwindung während der Trocknung die Festigkeit überschreiten oder wenn die maximale Dehnung erreicht wird, kommt es zur Rissbildung. Bei einer zu starken Erwärmung kann es zusätzlich zu Verfärbungen und zu Harzaustritt kommen.

## 4.2 Luftfeuchte

Durch die relative Luftfeuchtigkeit wird die Trocknungsgeschwindigkeit maßgeblich beeinflusst. Je geringer die relative Luftfeuchtigkeit  $j$  ist, um so größer ist die Wasseraufnahmekapazität der Luft. Durch eine Absenkung der relativen Luftfeuchtigkeit wird die Diffusion des Wasserdampfes von der Holzoberfläche in die überströmende Luft beschleunigt. Hierdurch wird ein Feuchtegefälle zwischen Holzoberfläche und den tieferliegenden Schichten erzeugt. Dieses Feuchtegefälle bewirkt wiederum den Feuchtetransport aus dem Holzinneren an die Brettoberfläche. Die Austauschvorgänge im Holz

---

<sup>2</sup> im englischen Sprachraum als "set" bezeichnet

werden durch entsprechend kleine Diffusions- und Wasserleitungsbeiwerte begrenzt und verlaufen wesentlich langsamer als die Wechselwirkungen zwischen Oberflächenschicht und Umluft (DREINER 1991). Unterhalb Fasersättigung besteht zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Gleichgewichtsfeuchte ein direkter Zusammenhang. Es ist darauf zu achten, dass die Gleichgewichtsfeuchte nicht zu niedrig ist, da dies sonst aufgrund der daraus resultierenden zu hohen Entfeuchtungsgeschwindigkeit zu Trocknungsfehlern führt.

### 4.3 Luftgeschwindigkeit

Bei der Luftführung im Versuchsaufbau handelt es sich um eine Querbeltüftung. Die Luft durchströmt den Holzstapel quer zur Faser bzw. Brettlängsachse. Zwecks optimaler Durchmischung der Luft im Stapel muss zwischen den einzelnen Brettern eine turbulente Strömung vorliegen. Eine turbulente Strömung weist einen 10 mal höheren Wärme- und Stoffübergang als eine laminare Strömung auf (ZIEREP 1993). Ein Richtwert der Geschwindigkeit für das Vorliegen einer turbulenten Strömung sind 2 m/s (ZIEREP 1993). Das Umschlagen von laminarer in turbulente Strömung erfolgt mit guter Genauigkeit für Innenströmung beim Erreichen einer  $Re_{\text{Krit}} \approx 2300$  (ZIEREP 1993). Die *Reynolds-Zahl*  $Re$  errechnet sich nach:

$$Re = \frac{r \cdot L \cdot v}{h} \quad (11)$$

Durch ein Umstellen der Formel kann die Mindestgeschwindigkeit  $v$  für das Vorliegen einer turbulenten Strömung errechnet werden.

### 4.4 Wechselklima

Bei Klimaschwankungen um einen vorgegebenen  $u_{gl}$ -Wert können den Einzelzyklen jeweils Abschnitte mit hoher rel. Luftfeuchte und Abschnitte mit niedriger rel. Luftfeuchte zugeordnet werden. Ziel der Versuche ist es aufzuzeigen, dass sich die Klimaschwankungen nicht nur direkt auf die Oberflächenschichten des Holzes auswirken, sondern auch einen indirekten Einfluss auf die inneren Bereiche haben. Dazu muss zunächst geklärt werden, in welchem Holzfeuchtebereich die Klimaschwankungen einen Einfluss auf Trocknungsgeschwindigkeit und Spannungen haben. Anschließend sind die Phasenlänge und Amplitude der Schwankung hinsichtlich Trocknungsgeschwindigkeit und Spannungen zu optimieren. Zusätzlich ist zu klären, welchen Einfluss die Kombination von Temperaturschwankungen und Luftfeuchteschwankungen haben.

Während des Projekts wurden Versuche mit konstanter Temperatur und Klimaschwankungen, die oberhalb Fasersättigung beginnen, durchgeführt. Die Mechanismen, die durch diese Zustände beeinflussbar sind, können folgendermaßen beschrieben werden:

#### Phase mit niedriger Luftfeuchte

In den Oberflächenschichten stellt sich eine niedrige Holzfeuchte ein, da die Austauschvorgänge zwischen Holzoberfläche und Umluft rasch erfolgen. Es stellt sich ein erhöhtes Feuchtegefälle

zwischen den äußeren und inneren Bereichen des Holzes ein. Durch den hierbei entstehenden Holzfeuchtegradienten wird die Geschwindigkeit des Feuchtetransports im Holz erhöht.

Einer Erhöhung der Transportgeschwindigkeit durch den Feuchtegradienten wirken wiederum drei Mechanismen entgegen:

1. Rein auf Diffusion basierende Feuchtetransportmechanismen.
2. Engere Transportwege für den Wasserdampf aufgrund der Schwindung der oberen Holzschichten.
3. Der Wärmeübergang und die Wärmeleitung verringert sich, wodurch in der gleichen Zeit weniger Energie auf das Holz aus der Umluft übertragen wird.

### **Phase mit hoher Luftfeuchte**

Durch die Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit werden die Oberflächenschichten des Holzes wiederbefeuchtet. Die Wiederbefeuchtung erfolgt jedoch nur bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte. Die Verringerung der Feuchteleitgeschwindigkeit aufgrund der obengenannten Mechanismen 2 und 3 wird bis zu einem gewissen Maß aufgehoben. Durch die Periodizität der Schwankungen um einen Mittelwert gleichen sich die positiven und negativen Effekte aus.

#### **4.4.1 Spannungsabbau durch zyklische Luftfeuchteschwankungen**

Holz hat die Eigenschaft Spannungen durch „Kriechen“ abzubauen. Diese Spannungsrelaxation steigert sich, wenn Holz Feuchte- und Temperaturschwankungen ausgesetzt wird. Der Effekt wird *mechano-sorptive creep* genannt (RANTA-MAUNUS 1990). Die  $S_1$ -Schicht und die  $S_2$ -Schicht der Zellwand weisen unterschiedliche Fibrillenwinkel auf. Aufgrund des Wechsels von einer Paralleltextrur mit einem Winkel von  $60^\circ - 80^\circ$  der Zellulose zur Längsachse ( $S_1$ ) zu einer Paralleltextrur mit einem Winkel von  $5^\circ - 30^\circ$  der Zellulose zur Längsachse ( $S_2$ ), liegt in diesem Bereich der Zellwand eine „natürliche Schwachstelle“ vor. Die beiden Zellwandschichten besitzen deutlich unterschiedliches Quell- und Schwindverhalten aufgrund der unterschiedlichen Fibrillenwinkel (SIAU 1984). Aufgrund der Feuchteschwankungen kommt es in diesem Bereich zu einer Ausbildung und Vergrößerung von Brüchen zwischen der  $S_1$ - und der  $S_2$ -Schicht der Zellwand. Die Festigkeit der Einzelzelle wird gemindert, und es kommt zu einem lokalen Spannungsabbau (MUKUDAI und YATA 1988). Die plastische Veränderung der Zellwandsubstanz wurde durch Langzeitbiegeversuche im elastischen Bereich bei zyklisch schwankender Luftfeuchtigkeit nachgewiesen (MOHAGER und TORATTI 1993). Die irreparablen Deformationen stiegen bei Zunahme des *mechano-sorptive creep*. In der Gesamtbetrachtung kommt es damit zu einem Spannungsabbau infolge der Klimaschwankungen.

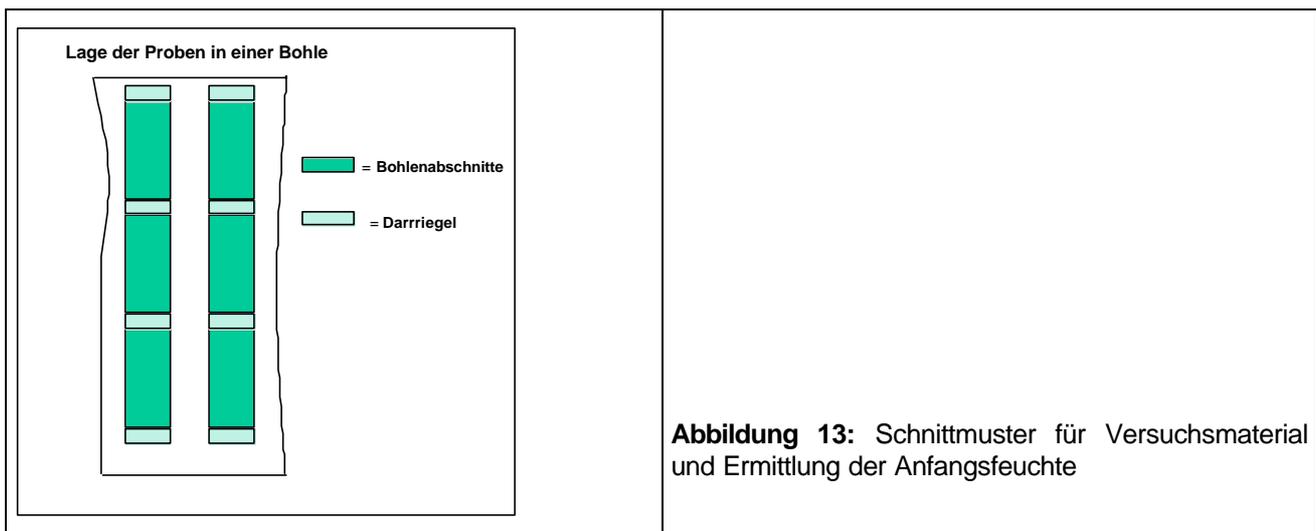
## 5 Trocknungsversuche

Die Trocknungsversuche wurden zur Kalibrierung und zur Optimierung des Regelungsverhaltens sowie zur Feststellung der Einflüsse des Wechselklimas auf das Trocknungsverhalten durchgeführt.

### 5.1 Versuchsanordnung für Labortrockner

Im Rahmen der Trocknungsversuche im kleinen Labortrockner wurde Kiefern-Splintholz mit den Abmessungen L x B x H: 500 x 110 x 30 mm<sup>3</sup> und Buchenholz mit den Abmessungen L x B x H: 500 x 200 x 60 m<sup>3</sup> getrocknet.

Im Zuge der Probenanfertigung wurden die Anfangsfeuchte der Bretter/Bohlen durch Entnahme von Darrriegeln an den Enden und zwischen den Probenkörpern ermittelt. Hierbei wurde zur Ermittlung der Anfangsfeuchte der Proben der Mittelwert von jeweils zwei Darrriegeln berechnet.



Die Vorbereitungen und der Ablauf der Trocknungen wurden jeweils für alle Proben in gleicher Weise durchgeführt. Für die Versuche mit KiefernSplintholz wurden „matched samples“ angefertigt, d.h., aus einem Brett wurden jeweils vier 500 mm lange, hintereinander liegende Proben geschnitten, die anschließend unterschiedlichen Trocknungsbedingungen ausgesetzt wurden. Bei der Anfertigung des Probenmaterials für die Buchenholztrocknungen war dies leider nicht immer möglich. Es wurde zwar versucht, vergleichbare Bohlenabschnitte zu erzeugen; bedingt durch Faserabweichungen, Äste und andere Holzfehler in den Buchenbohlen sowie durch eine gewisse Vortrocknung des Materials konnte nicht davon ausgegangen werden, dass die Versuchsbretter für die Trocknungsversuche B1 bis B3 exakt übereinstimmten. Jede Trocknercharge bestand aus 14 Brettabschnitten (Kiefer) bzw. 8 Bohlenabschnitten (Buche), die in Richtung des Luftstroms auf zwei hintereinander liegende Stapel aufgeteilt waren.

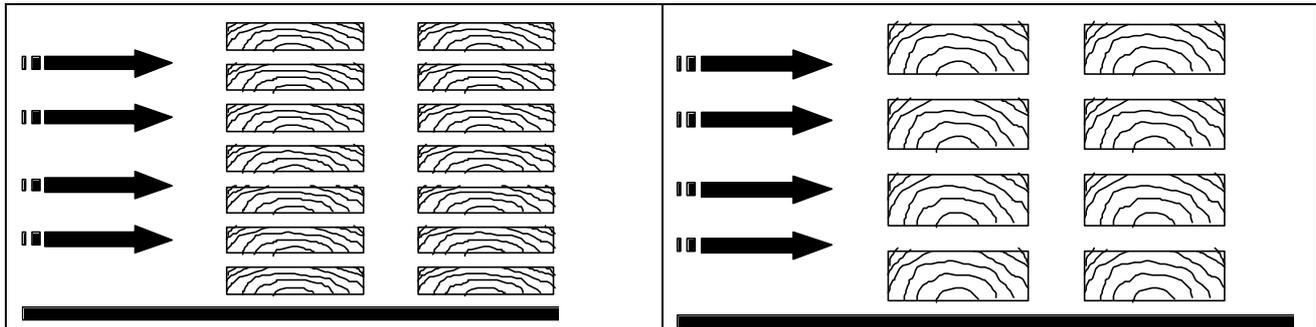


Abbildung 14: Anordnung der Stapel im Trockner (Kiefer 30 mm = 7 Lagen, Buche 60 mm = 4 Lagen)

Die Kiefernholzproben (*pinus sylvestris*) und die Buchenholzproben (*fagus silvatica*) wurden an den Hirnenden mit einem Bitumen-Epoxydharzgemisch sowie Aluminiumfolie abgedichtet, um den Randeffekt (Wasserverdunstung über die Hirnenden) zu minimieren.

Dieser Randeffekt beruht auf der sehr hohen Wegsamkeit für Wasser und Wasserdampf in longitudinaler Richtung. Der Wassertransport ist in longitudinaler Richtung 10 bis 25 mal höher (abhängig von dem Feuchtegehalt und der Temperatur) als in tangentialer oder radialer Richtung (CLOUTIER und FORTIN 1993), da es bei Kiefernholz zu keinem Tüpfelverschluß der longitudinal ausgerichteten Tracheiden kommt (KOLLMANN 1951). Die Auswirkung des Randeffektes sind auf die ersten 30 bis 50 cm eines Brettes von den Hirnenden aus beschränkt. Holzfeuchtedaten aus den vom Randeffekt betroffenen Brettabschnitten dürfen nicht für die Regelung verwendet werden, da diese aufgrund des hohen Wassertransportes unter der mittleren Brettfeuchte liegen.

Die Elektroden wurden mit einem Abstand von 32 mm quer zur Faserlängsrichtung eingeschlagen. Die verwendeten Elektroden sind handelsübliche Edelstahlelektroden, die im Bereich zwischen Messkopf und Anschlussbohrung mit einem isolierenden Schutzanstrich versehen sind. Die Oberflächenelektroden bestehen nur aus angefastem Messkopf und Anschlussbohrung. An zwei Brettern wurden drei Elektrodenpaare mit einem Abstand von vier cm zueinander angebracht. An zwei weiteren Brettern wurden jeweils ein Kernelektrodenpaar für Einzelmessungen eingeschlagen. Somit wurde die Holzfeuchte bei den Versuchen mit Kiefernholz aus acht Brettfeuchten ermittelt (zwei Bretter mit Dreifachmessung und zwei Bretter mit Einzelmessung). Bei den Trocknungsversuchen mit Buchenholzbohlen wurden die alle 8 Messelektroden auf 0,3 der Bohlendicke eingeschlagen.

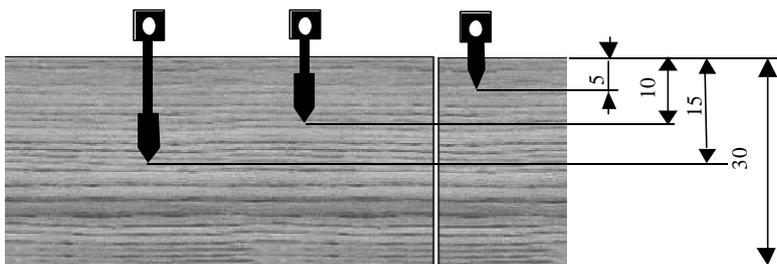


Abbildung 15: Längsschnitt eines Kiefern Brettes mit Einschlagtiefen [mm] der Elektroden

## 5.2 Versuchsdurchführung im Labormaßstab

Neben einer Vielzahl von Vorversuchen wurden 6 Hauptversuche mit Kiefernspiltholz (K) und 3 Hauptversuche mit Buchenholz (B) durchgeführt. Die Vorversuche dienten zur Kalibrierung der Regelungsroutine und dem Test des Programms. Als Probenmaterial für die Vorversuche ist Kiefernspiltholz gewählt worden. Das Holz wurde nach jeder Trocknung durch eine Druckimprägnierung wiederbefeuchtet und konnte erneut verwendet werden. Die Vorversuche beschränkten sich nur auf Ausschnitte der Trocknung und wurden abgebrochen, nachdem das Ziel des jeweiligen Versuchs erreicht war.

Die Hauptversuche mit Kiefernholz teilten sich in zwei Versuchsreihen auf. Die Versuchsreihe 1 bestand aus Versuch K1 bis K4. Die Versuchsreihe 2 bestand aus Versuch K5 und K6. Durch die Verwendung von „matched samples“ war die Zusammensetzung des Probenmaterials der jeweiligen Versuchsreihe weitgehend identisch.

Das Probenmaterial der Hauptversuche war analog zu den Vorversuchen Kiefernspiltholz. Um sicherzustellen, dass das Holz absolut kernfrei war, wurden alle Probenbretter einem Test mit Kiefernkernreagenz<sup>3</sup> unterzogen.

Zusätzlich wurde eine Versuchsreihe mit Buchenholz durchgeführt, anhand derer der Einfluss der Brettstärke und einer verringerten Permeabilität ermittelt werden sollte. Für die Analyse des Trocknungsverhaltens werden die Ergebnisse beider Versuchsreihen (Kiefer und Buche) verwendet. Die Trocknungszeiten der ersten und zweiten Kiefern-Versuchsreihe sind jedoch nicht direkt miteinander vergleichbar, da die zweite Versuchsreihe eine höhere Anfangsfeuchte besaß. Im Falle der Buchentrocknungen differierten die Anfangsfeuchten ebenfalls. Aus diesem Grund konnten die Buchentrocknungen nur abschnittsweise miteinander verglichen werden.

Der Ablauf der Trocknungsversuche gliederte sich in folgende Schritte:

- Zuschnitt der Proben und Verteilung auf identische Trocknungsladungen
- Gewichtsbestimmung der Einzelbretter vor der Trocknung
- Feuchtebestimmung der Einzelbretter mittels Darrproben an benachbarten Querriegeln
- Trocknerbeschickung unter Berücksichtigung der Brettposition im Stapel
- Trocknung nach Trocknungsplan
- Gewichtsbestimmung der Einzelbretter nach der Trocknung
- Bestimmung der Endfeuchte mittels Darrproben an Querriegeln
- Bestimmung der Verschalung durch Mittelschnitttest

Für die erste Versuchsreihe mit Kiefernholz (K1 - K4) wurden drei Trocknungspläne erstellt. Sie basieren auf der gleichen Grundstruktur und variieren nur bezüglich der Vorgaben für die Gleichgewichtsfeuchte (konstantes  $u_{gl}$  bzw. Wechselklima, d.h. oszillierendes  $u_{gl}$ ). Bei den

---

<sup>3</sup> Die Kiefernkernreagenz setzt sich aus 50 Teilen 1 %ige Orthoanisidinlösung und 50 Teilen 10 %ige Natriumnitritlösung zusammen. Bei einer Reaktion mit Kerninhaltsstoffen kommt es zu einer deutlichen Rotverfärbung des Holzes.

Trocknungsversuchen mit Buchenholz wurde die gleiche Vorgehensweise gewählt. Die identischen Teile der Grundstruktur bezüglich der fünf Phasen der Trocknung sind:

- **Aufheizphase**  
Aufheizen auf 65°C mit einer Temperaturerhöhung von 15°C/h und einem  $u_{gl} = 15 \%$ .
- **Durchwärmungsphase**  
Halten der Temperatur auf 65°C und einem  $u_{gl} = 15 \%$  über zwei Stunden, damit zu Beginn der Trocknung eine homogene Temperaturverteilung im Einzelbrett und im Stapel vorliegt.
- **Trocknung**  
Die Vorgaben für  $u_{gl}$  und Temperatur richten sich nach der aktuellen Holzfeuchte, wobei für alle vier Versuche ein identischer Grundtrocknungsplan gewählt wurde.

Holzfeuchtebereich	Temperatur [°C]	$u_{gl}$ [%]
> 50	65	12
50 - 45	65	12
45 - 40	65	12
40 - 35	65	12
35 - 30	65	12
30 - 25	65	12
25 - 20	70	10
20 - 15	75	7
15 - 10	80	4,5
10 - 5	80	3

**Tabelle 3:** Temperatur und Gleichgewichtsfeuchte (Grundtrocknungsplan für Kiefer)

Holzfeuchtebereich	Temperatur [°C]	$u_{gl}$ [%]
> 50	55	19
50 - 45	60	17
45 - 40	65	16
40 - 35	65	15
35 - 30	65	14
30 - 25	65	13
25 - 20	70	11
20 - 15	75	9
15 - 10	75	6
10 - 5	75	3

**Tabelle 4:** Temperatur und Gleichgewichtsfeuchte (Grundtrocknungsplan für Buche)

Über die Sollwerte für das  $u_{gl}$  wurden in den Versuchen K2, K3 und K5 mit Kiefernspiltholz zyklische Klimaschwankungen gelegt. Diese zyklischen Schwankungen wurden auch beim Übergang in den nächsten Holzfeuchtebereich beibehalten und nicht erneut gestartet. Der Bereich der  $u_{gl}$  bzw. Luftfeuchteschwankungen erstreckte sich vom Beginn der Trocknung bis zu einer Holzfeuchte von

20 %. Damit wurden die Schwankungen erst nach Unterschreitung des Fasersättigungspunktes gestoppt. Die Schwankungen um den  $u_{gl}$ -Mittelwert gestalteten sich folgendermaßen:

Holzfeuchtebereich	Sollwerte $u_{gl}$ [%]			
	Versuche K1, K4 und K6	Versuch K2	Versuch K3	Versuch K5
> 50	12	12 ± 3	12 ± 1,5	12 ± 3
50 - 45	12	12 ± 3	12 ± 1,5	12 ± 3
45 - 40	12	12 ± 3	12 ± 1,5	12 ± 3
40 - 35	12	12 ± 3	12 ± 1,5	12 ± 3
35 - 30	12	12 ± 3	12 ± 1,5	12 ± 3
30 - 25	12	12 ± 3	12 ± 1,5	12 ± 3
25 - 20	12	12 ± 3	12 ± 1,5	12 ± 3
20 - 15	7	7	7	7
15 - 10	4,5	4,5	4,5	4,5
10 - 5	3	3	3	3

**Tabelle 5:** Auflistung der  $u_{gl}$ -Vorgaben für Trocknungsversuche K1 bis K6 mit Kiefernspiltholz

Holzfeuchtebereich	Sollwerte $u_{gl}$ [%]		
	Versuche B1	Versuch B2	Versuch B3
> 50	19	19 ± 2	19 ± 2
50 - 45	17	17 ± 2	17 ± 2
45 - 40	16	16 ± 2	16 ± 2
40 - 35	15	15 ± 2	15 ± 2
35 - 30	14	14 ± 2	14 ± 2
30 - 25	13	13 ± 2	13 ± 2
25 - 20	11	11 ± 2	11 ± 2
20 - 15	9	9	9
15 - 10	9	6	6
10 - 5	3	3	3
Frequenz [h]	-	2	4

**Tabelle 6:** Auflistung der  $u_{gl}$ -Vorgaben für Trocknungsversuche B1 bis B3 mit Buchenholz

- **Konditionierphase**

Kiefer 30 mm: Erniedrigung der Temperatur auf 60°C bei einem  $u_{gl} = 8$  %. Dauer der Konditionierphase 3 Stunden.

Buche 60 mm: Nach Ende der Trocknungsphase wurden die Bohlenabschnitte zur Entnahme von Verschalungsproben für den Mittenschnitttest entnommen. Anschließend wurden die Reststücke einer 18-stündigen Konditionierung ausgesetzt, an die sich eine erneute Entnahme von Verschalungsproben anschloss.

- **Abkühlung**

Abkühlung auf 35°C bei einem  $u_{gl} = 8 \%$  (Kiefer) und  $u_{gl} = 10\%$  (Buche).

Damit unterscheiden sich die Versuche ausschließlich in der Frequenz und Amplitude der Sollwertvorgaben für die Klimaschwankungen im Bereich oberhalb  $u_{gl} = 20 \%$ .

Versuch K4 ist eine Wiederholung des Versuches K1. Der Versuch K4 sollte zur Verifizierung der Referenztrochnung (Versuch K1) dienen. Die Trocknungsdaten konnten jedoch weder für die Analyse der Trocknungsdauer, noch zur Analyse der Regelungsgüte verwendet werden, da es aufgrund einer fehlerhaften Ventilstellung des Dampf-Bypasses zu unkontrollierten Schwankungen der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit kam. Die Schwankungen besaßen sehr kurze synchrone Schwingungen. Die Trocknung kann aufgrund der Gleichmäßigkeit der Schwankungen als extreme Wechselklimatrocknung mit minimaler Amplitude und Phasenlänge angesehen werden.

Die Versuche der zweiten Versuchsreihe sind auf dem gleichen Trocknungsschema wie die Versuche der ersten Versuchsreihe aufgebaut. Versuch K5 ist eine Wechselklimatrocknung mit einer Amplitude von  $\pm 3 \%$  um den Mittelwert von  $u_{gl} = 12 \%$  und einer Frequenz von 2 Stunden pro Wechselklimaphase. In Versuch K6 wurde versucht, die extremen Klimaschwankungen des Versuches K4 zu reproduzieren. Dies gelang jedoch nicht, da die Schwankungen nicht gleichmäßig erfolgten und sich die Regelung nach 20 Stunden stabilisierte. Die Trocknung ging somit in eine Konstantklimatrocknung über.

Eine Wechselklimaphase teilt sich in einen Phasenabschnitt mit hoher Luftfeuchtigkeit und einen Phasenabschnitt mit niedriger Luftfeuchtigkeit auf. Bei einer Phasenlänge von zwei Stunden beträgt die Dauer eines Phasenabschnitts somit eine Stunde.

In Tabelle 7 sind die Trocknungsbedingungen der Versuche K1 bis K6, und in Tabelle 8 für B1 bis B3 zusammengefasst.

Versuch	Klima- bedingungen	Amplitude	Phasen- länge	Bemerkungen
K1	Konstantklima	-	-	
K2	Wechselklima	$\pm 3 \%$	4 h	
K3	Wechselklima	$\pm 1,5 \%$	2 h	
K4	Konstantklima	-	-	<i>extreme Wechselklimatrocknung</i>
K5	Wechselklima	$\pm 3 \%$	2 h	
K6	Konstantklima	-	-	<i>Reproduktion der Bedingungen aus Versuch 4. Übergang in Konstantklima</i>

**Tabelle 7:** Trocknungsbedingungen der Versuche K1 bis K6 mit Kiefernspiltholz

Versuch	Klima- bedingungen	Amplitude	Phasen- länge	Bemerkungen
B1	Konstantklima	-	-	Referenz
B2	Wechselklima	$\pm 2\% u_{gl}$	2 h	
B3	Wechselklima	$\pm 2\% u_{gl}$	4 h	

**Tabelle 8:** Trocknungsbedingungen der Versuche B1 bis B3 mit Buchenholz

## 6 Ergebnisse der Trocknungen im Labormaßstab

Bei der Analyse der Trocknungen sind die Ergebnisse bezüglich der Regelungsgüte des Trockners und der Wirkung der Klimaschwankungen auf den Verlauf der Trocknungen auszuwerten.

### 6.1 Regelungsgüte

Die Aufgabe der Trocknerregelung ist die Umsetzung der Sollwertvorgaben. Diese Umsetzung muss zügig und genau erfolgen. Dieses bedeutet, dass die Regelabweichung  $e$  und das Schwingverhalten  $e(t)$  des Regelkreises minimiert werden müssen. Weitere Kriterien der Regelungsgüte sind die *maximale Überschwingweite*  $e_{max}$ , der *Zeitpunkt der maximalen Überschwingweite*  $t_{max}$  und die *Ausregelzeit*  $t_{\epsilon}$  (UNBEHAUEN 1996).

Die maximale Überschwingweite  $e_{max}$  gibt den Betrag der maximalen Regelabweichung an, welche nach erstmaligem Erreichen des Sollwertes auftritt. Die hierfür benötigte Zeitspanne beschreibt  $t_{max}$ . Die Ausregelzeit  $t_{\epsilon}$  ist der Zeitpunkt, ab dem der Betrag der Regelabweichung eine vorgegebene Schranke  $\epsilon$  unterschreitet und sich die Regelung eingeschungen hat.

Für die Beurteilung des Regelungsverhaltens wurden Versuch K1, Versuch K3 und Versuch K5 gewählt. Versuch K2 und Versuch K4 konnten nicht für die Beurteilung des Regelungsverhaltens verwendet werden, da es zu unkontrollierten Schwankungen der Temperatur aufgrund einer fehlerhaften Ventilstellung des Dampf-Bypasses kam. Versuch K5 ist eine Wiederholung des Versuches K2 bezüglich der Temperaturniveaus sowie der Amplitude der Klimaschwankungen. Versuch K5 ist somit für die Beurteilung geeignet.

Das Klima im Trockner setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: der Temperatur und der relativen Luftfeuchte. Somit kann das Regelungsverhalten hinsichtlich dieser beiden Parameter untersucht werden.

#### 6.1.1 Regelungsgüte der Temperaturregelung

Die Temperaturregelung des Trocknungsabschnitts beinhaltet vier Temperaturniveaus (Tabelle 3). Die Verweildauer auf dem jeweiligem Temperaturniveau wird durch die momentane Holzfeuchte bestimmt. Gelangt die Holzfeuchte in einen niedrigeren Bereich, so wird der neue Sollwert der Temperatur an die Regelung übergeben. Die Regelung durchläuft je Temperaturstufe zwei Abschnitte. Zuerst erfolgt die Sollwertänderung auf das nächste Temperaturniveau. Es handelt sich dabei um eine sprunghafte Änderung, die in möglichst kurzer Zeit bewältigt werden muss. Ist der neue Sollwert erreicht, besteht dann die Aufgabe in der konstanten Langzeitregelung unter Minimierung der Regelabweichung. Der mit einem höheren Temperaturniveau verbundene Wärmeverlust des Trockners muss zusätzlich durch die Langzeitregelung bewältigt werden. Es wurde auf verschiedenen Temperaturniveaus (65°C, 70°C, 75°C, 80°C) getrocknet.

Das Aufheizen des Trockners auf das erste Temperaturniveau geschieht über eine Temperaturrampe von 15°C/h. Der Sollwert der Temperatur in der Aufheizphase wird jede Minute um 0,25°C erhöht. Durch die ständige Erhöhung des Sollwertes wird das trägheitsbedingte Überschwingen gedämpft. Die Aufheizphasen hatten im Mittel eine Sollwertüberschreitung von 0,25°C, bei einem Maximum von 0,55°C Sollwertüberschreitung und von 0,5°C Sollwertunterschreitung.

Ziel der Versuche war es, die Regelungsgüte der Temperaturregelung sowohl bei einer zyklischen Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit, als auch bei einer Konstanz der relativen Luftfeuchtigkeit zu ermitteln. Die Luftfeuchteschwankungen beschränkten sich auf die Temperaturniveaus 65°C und 70°C.

### 6.1.1.1 Sprunghafte Änderung des Sollwertes *Temperatur*

Aus der Tabelle 9 kann das Antwortverhalten der Regelung auf die sprunghafte Änderung des Sollwertes entnommen werden. Es wird deutlich, dass in den Versuchen nahezu identisches Regelungsverhalten vorliegt. Mit jedem Sprung auf ein höheres Temperaturniveau benötigt die Regelung mehr Zeit. Dieses erklärt sich durch den gesteigerten Wärmeverlust an die Umgebung und der begrenzten Heizleistung des Trockners. Bezogen auf die Dauer der einzelnen Temperaturstufen und unter der Betrachtung von  $t_e$  kann das Regelverhalten bei einem Sollwertsprung als „flink“ bezeichnet werden. Das Überschwingverhalten von durchschnittlich 0,8°C liegt unterhalb der Toleranzgrenze von  $\varepsilon = 3 \%$  (UNBEHAUEN 1996).

	Sollwertänderung	$e_{\max}$ [°C]	$t_{\max}$ [min]	$t_e$ [min]
<b>Versuch K1</b>	von 65°C auf 70°C	1	6	10
	von 70°C auf 75°C	0,5	8	13
	von 75°C auf 80°C	1	13	14
<b>Versuch K3</b>	von 65°C auf 70°C	1,2	6	10
	von 70°C auf 75°C	1,4	10	14
	von 75°C auf 80°C	0,5	12	14
<b>Versuch K5</b>	von 65°C auf 70°C	0,5	6	10
	von 70°C auf 75°C	0,7	10	12
	von 75°C auf 80°C	0,3	13	14

**Tabelle 9:** Regelungsgüte bei sprunghafter Änderung des Sollwertes der Temperatur

### 6.1.1.2 Konstanter Sollwert *Temperatur*

Bei dem Langzeitregelungsverhalten mit konstantem Sollwert können zwei Punkte betrachtet werden:

- die Abweichung des Mittelwertes vom Sollwert
- die Streuung der einzelnen Temperaturwerte um den Mittelwert

#### Abweichung vom Sollwert

Durch die Mittelung der einzelnen Temperaturwerte wird die Schwingung des Temperaturverlaufs herausgefiltert. Die Differenz des Mittelwertes vom Sollwert beschreibt die mittlere Abweichung vom Sollwert. Die Abweichung verdeutlicht, in wie weit die Regelung in der Lage ist, die Sollwertvorgaben zu erfüllen.

Im Bereich der Klimaschwankungen ist kein signifikanter Verlust der Regelungsgüte festzustellen. Vielmehr wird der Einfluss der steigenden Wärmeverluste auf den hohen Temperaturniveaus deutlich. Der Mittelwert aus den Versuchen K1, K3 und K5 steigt beginnend mit einer Differenz von 0,09°C bei 65°C auf eine Differenz von 0,22°C bei 80°C an. Diese mittlere Unterschreitung des Sollwertes ist jedoch äußerst gering.

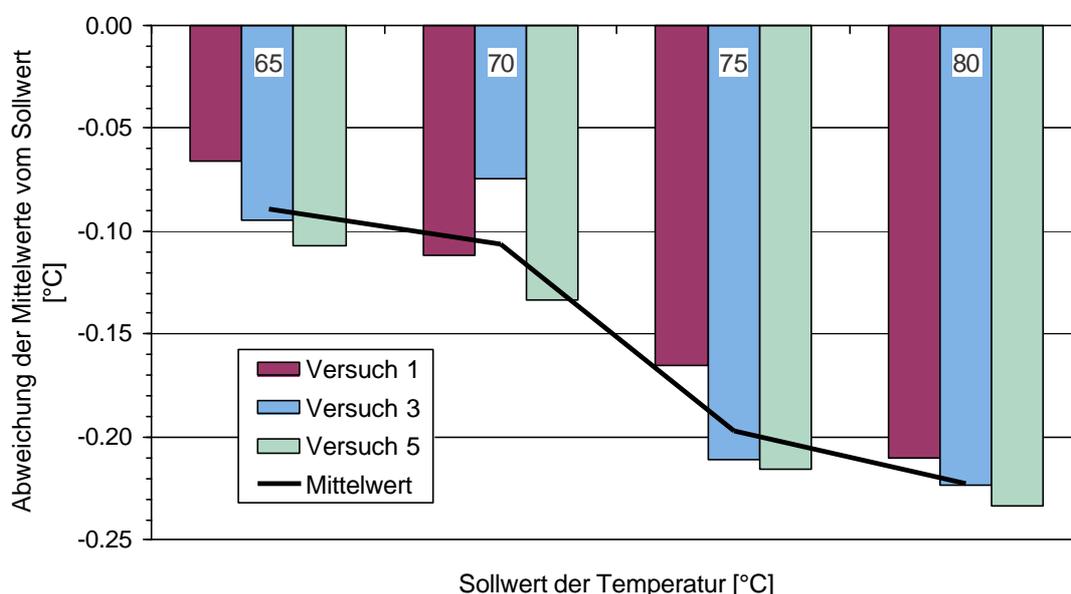


Abbildung 16: Differenz der Mittelwerte vom Sollwert bezüglich des Temperaturniveaus (Kiefer)

### Streuung der Temperatur

Durch die Bildung der Standardabweichung der einzelnen Temperaturwerte wird die Schwingung der Temperatur verdeutlicht. Im Gegensatz zur Abweichung vom Sollwert ist bei der Betrachtung der Schwingung ein Einfluss der Luftfeuchteschwankung festzustellen.

Der mit Konstantklima gefahrene Versuch K1 weist eine minimale Abhängigkeit der Regelungsgüte vom Temperaturniveau auf (Abbildung 17). Auf den Temperaturniveaus 65°C, 70°C und 75°C bleibt die Standardabweichung nahezu konstant. Erst auf dem höchsten Temperaturniveau steigt die Standardabweichung von 0,15 auf 0,27 an.

Auf den Temperaturniveaus 75°C und 80°C gelten für alle Versuche die selben Sollwertvorgaben. Die Standardabweichungen auf diesen beiden Niveaus sind für alle Versuche annähernd gleich. Dieses spiegelt die Reproduzierbarkeit der Regelungsgüte wider.

Der Anstieg der Standardabweichung im Mittel von 0,16 bei 75°C auf 0,32 bei 80°C ist auf zwei Ursachen zurückzuführen. Zum einen erhöht sich der Energieverlust des Trockners, zum anderen liegen die Sollwerte des  $u_{gl}$  dieses Temperaturniveaus bei 4,5 % und 3 %. Um die mit diesen  $u_{gl}$ -Werten verbundenen Luftfeuchten zu erreichen, werden die F/A-Klappen weit geöffnet. Bei einer Trocknerinnentemperatur von 80°C liegt ein Temperaturunterschied von 60°C zwischen Außenluft und Innenluft vor. Der mit dem Luftaustausch verbundene Energieverlust muss ständig ausgeglichen werden. Die Heizintervalle<sup>4</sup> werden deutlich kürzer, wodurch die Schwingungen intensiviert werden.

Auf dem Temperaturniveau 65°C weist Versuch K5 mit 0,38 die größte Standardabweichung auf. In diesem Bereich liegt, bedingt durch die Wechselklimavorgaben, die größte Amplitude der  $u_{gl}$ -Schwankungen. Aufgrund der großen  $u_{gl}$ -Schwankungen muss bei einem Sprung des  $u_{gl}$ -Sollwertes sehr viel Wasserdampf zur Luftbefeuchtung eingesprüht werden. Wie sich bereits in Vorversuchen zeigte, übersteigt die benötigte Dampfmenge kurzzeitig die Kapazität des Sprühdampferzeugers. Die Regelung ist nicht in der Lage, den Sollwert zu erreichen. Der Istwert des  $u_{gl}$  bleibt unterhalb des Sollwertes. In diesem Moment greift die Sicherheitsroutine der Trocknerregelung, d.h. die Heizung wird ausschaltet. Die Temperatur fällt solange, bis das  $u_{gl}$  die Untergrenze des  $u_{gl}$ -Sicherheitslevels erreicht. In diesem Moment gibt die Sicherheitsroutine die Temperaturregelung wieder frei und es kommt im Zuge der Regelung zu einem kurzzeitigen Überschwingen der Temperatur. Hieraus resultiert die erhöhte Standardabweichung. Wird der Temperaturverlauf um die „Überschwinger“ bereinigt, ergibt sich eine Standardabweichung von 0,25. Dieser Wert liegt nur 0,04 über der Standardabweichung des Versuches 3<sup>5</sup>.

Auf dem Temperaturniveau 70°C haben Versuch K3 und Versuch K5 mit 0,27 dieselben Standardabweichungen. Diese liegen mit 0,14 über der Standardabweichung der Konstantklimaregelung.

Abschließend kann festgestellt werden, dass eine zyklische Schwankung des  $u_{gl}$  nur einen minimalen Einfluss auf die Regelungsgüte der Temperatur bewirkt.

---

<sup>4</sup> Bei der Heizung handelt es sich um eine elektrische Heizung mit Zweipunkt-Regler (Ein/Aus). Die Heizleistung wird manuell in Stufen geschaltet.

<sup>5</sup> Die Standardabweichung von 0,25 des Versuches K5 auf dem Temperaturniveau 65°C ist in Abbildung 17 nicht eingezeichnet.

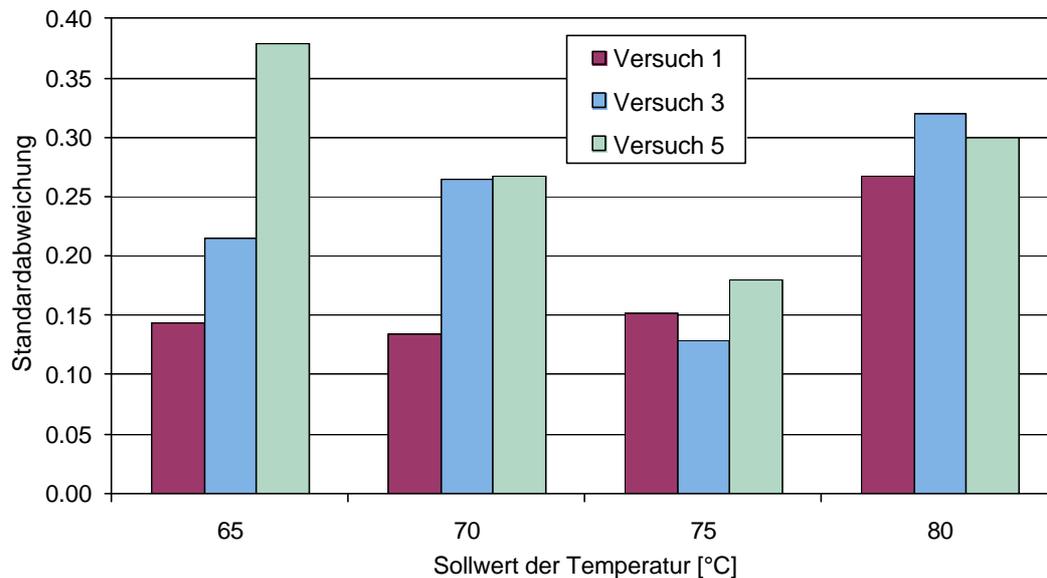


Abbildung 17: Standardabweichung der Temperatur bezüglich der Temperaturniveaus

### 6.1.2 Regelungsgüte der Luftfeuchteregelung

Die Güte der  $u_{gl}$ -Regelung kann nach denselben Kriterien wie bei der Temperatur beurteilt werden. So muss einerseits das Regelverhalten bei sprunghafter Änderung des Sollwertes und andererseits das Langzeitregelverhalten betrachtet werden.

#### 6.1.2.1 Sprunghafte Änderung des Sollwertes $u_{gl}$

Bis zum Erreichen einer Holzfeuchte von 25 % war für den Versuch K1 ein  $u_{gl}$ -Sollwert von 12 % vorgegeben. Versuch K3 wurde mit einer Schwankung von  $\pm 1,5$  %, Versuch K5 mit Schwankung von  $\pm 3$  % um den Mittelwert  $u_{gl} = 12$  % beaufschlagt. Im weiteren Verlauf der Trocknung galten für alle drei Versuche dieselben  $u_{gl}$ -Sollwertvorgaben von 7 %, 4,5 % und 3 %, je nach Holzfeuchtebereich.

Die maximale Sollwertüberschreitung bzw. -unterschreitung  $e_{max}$  betrug 1 %  $u_{gl}$  (Tabelle 10), wobei die Höhe des Sollwertsprungs keinen erkennbaren Einfluss auf die Höhe des Überschwingens hat. Auch die Höhe des Temperaturniveaus hat keinen erkennbaren Einfluss auf die Höhe des Überschwingens.

Die Zeitspanne  $t_{max}$  bis zum Erreichen des maximalen Überschwingens schwankte zwischen sechs und zehn Minuten. Der Vergleich von Versuch K3 und Versuch K5 verdeutlicht den Einfluss der Sprunghöhe auf die Zeitspanne  $t_{max}$ . Für einen Sprung des  $u_{gl}$  von 10,5 % auf 13,5 % in Versuch K3 benötigt die Regelung acht Minuten, für einen Sprung des  $u_{gl}$  von 9 % auf 15 % in Versuch K5 benötigt die Regelung 14 Minuten. Einen Einfluss der Temperatur auf die Zeitspanne  $t_{max}$  wurde nicht beobachtet.

Die Einschwingdauer  $t_e$  reichte von 6 bis 20 Minuten. Mit steigender Temperatur stieg die gemittelte Einschwingdauer von 13 Minuten bei 70°C auf 20 Minuten bei 80°C. Somit ist ein Einfluss der Temperatur auf die Einschwingdauer  $t_e$  festzustellen.

In Tabelle 10 ist die Regelungsgüte bei sprunghafter Änderung des Sollwertes für die einzelnen Feuchtestufen zusammengefasst. Alle Versuche zeigten annähernd gleiches Regelverhalten bei einer sprunghaften Änderung des  $u_{gl}$ -Sollwertes. Die Regelung bewältigt jeden Sprung des Sollwertes mit akzeptablem Überschwingverhalten, wobei die Geschwindigkeit der Änderung von der Befeuchtungsleistung der Anlage und der Temperatur abhängt.

	Sollwertänderung	$e_{\max}$ [ $u_{gl}$ %]	$T_{\max}$ [min]	$t_e$ [min]
<b>Versuch K1</b>	von 12 % auf 10 %	0,8	4	6
	von 10 % auf 7 %	1	6	12
	von 7 % auf 4,5 %	1	8	16
	von 4,5 % auf 3 %	0,5	8	20
<b>Versuch K3</b>	von 13,5 % auf 10,5 %	0,2	8	12
	von 10,5 % auf 13,5 %	0,1	8	10
	von 7 % auf 4,5 %	0,5	8	16
	von 4,5 % auf 3 %	0,5	8	20
<b>Versuch K5</b>	von 15 % auf 9 %	0,1	12	14
	von 9 % auf 15 %	0,7	14	16
	von 7 % auf 4,5 %	0,5	10	16
	von 4,5 % auf 3 %	0,5	10	18

**Tabelle 10:** Regelungsgüte bei sprunghafter Änderung des Sollwertes des  $u_{gl}$

### 6.1.2.2 Konstanter Sollwert $u_{gl}$

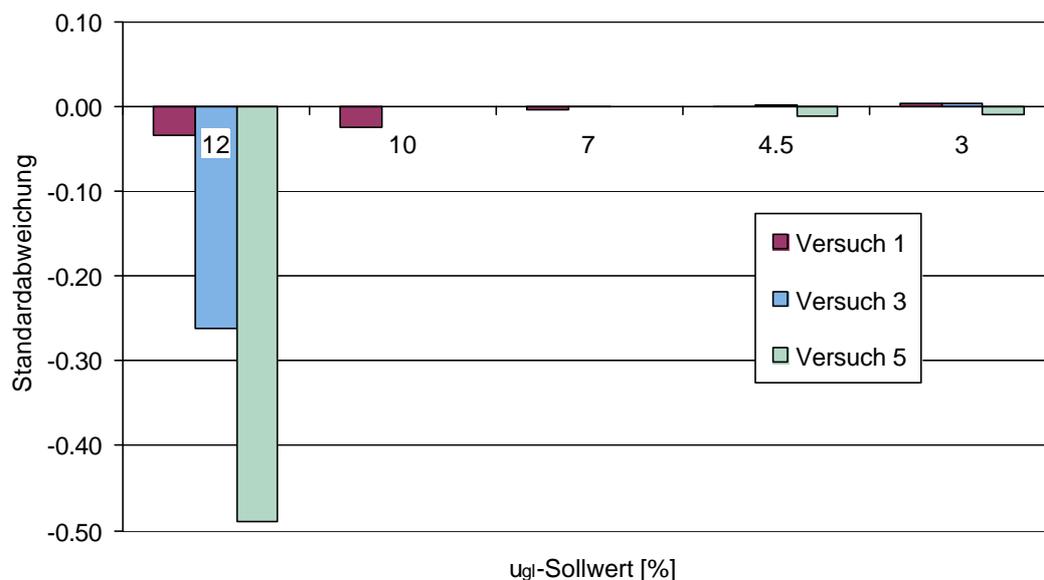
Die Regelungsgüte der Langzeitregelung kann, parallel zur Temperatur, durch die Mittelwertbildung der  $u_{gl}$ -Daten und durch die Standardabweichung beurteilt werden. Somit erhält man eine Aussage über:

- die Abweichung des Mittelwertes der jeweiligen Feuchtestufe vom Sollwert
- die Streuung der einzelnen  $u_{gl}$ -Werte um den Mittelwert

### Abweichung vom Sollwert

Bei der Abweichung der Mittelwerte vom Sollwert ist ein deutlicher Einfluss des Wechselklimas auf die Regelungsgüte festzustellen. Versuch 1 unterschreitet den Sollwert im Mittel nur um 0,03.

Versuch K3 mit  $\pm 1,5\%$  Amplitude um 0,23 und Versuch K5 mit  $\pm 3\%$  Amplitude um 0,49. Dies bedeutet einen Verlust der Regelungsgüte bei steigender Amplitude der Klimaschwankungen. Für die Regelung unter konstanten  $u_{gl}$ -Sollwerten zeigt sich, dass mit einer maximalen Abweichung von 0,02 die Regelung absolut genau erfolgt.



**Abbildung 18:** Abweichung des  $u_{gl}$ -Mittelwertes vom Sollwert. Versuch 1 bis 3

Zur Beurteilung der Regelungsgüte des Wechselklimas in Abhängigkeit von der Temperatur wurden die einzelnen Sollwertstufen separiert. Dadurch konnte ein Trend der Sollwertabweichung sowohl für die Temperatur, als auch für die Höhe des  $u_{gl}$ -Sollwertes festgestellt werden.

Mit fallendem  $u_{gl}$ -Sollwert nimmt die Unterschreitung des Sollwertes ab, bis es bei  $u_{gl} = 9\%$  zu einer Sollwertüberschreitung kommt (Abbildung 19).

Eine Temperaturerhöhung von  $65^{\circ}\text{C}$  auf  $70^{\circ}\text{C}$  intensiviert die Sollwertunterschreitung. Es wird deutlich, dass für die Feuchtestufe von  $15\%$  bei  $65^{\circ}\text{C}$  und  $70^{\circ}\text{C}$  sowie für die Feuchtestufe von  $13,5\%$  bei  $70^{\circ}\text{C}$  eine erhebliche Abweichung vom Sollwert vorliegt.

Um diese Abweichung zu minimieren müsste die Regelung verschärft werden. Dies wird durch die Vergrößerung des I-Anteils und des P-Anteils des Reglers erreicht. Aufgrund der relativ kurzen Intervalle des Wechselklimas ist dann jedoch eine Stabilität des Systems nicht mehr gewährleistet. Eine weitere Möglichkeit zur Minimierung der Abweichung wäre die Erhöhung des Sollwertes um den Betrag der Unterschreitung. Dieses wäre eine einfache und effektive Lösung, die allerdings nicht die reale Regelungsgüte verbessert, da der neue Sollwert ebenfalls unterschritten wird.

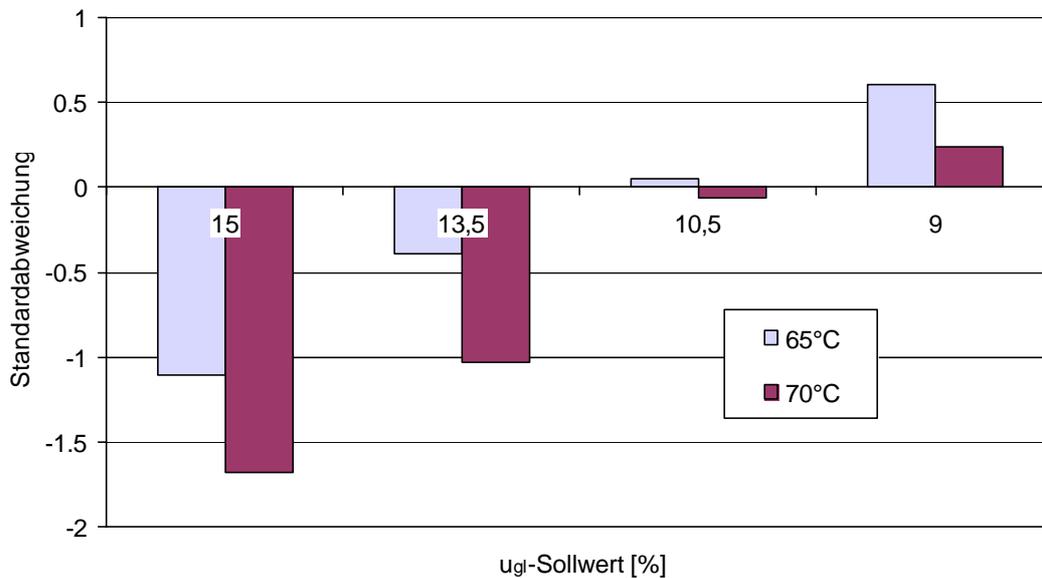


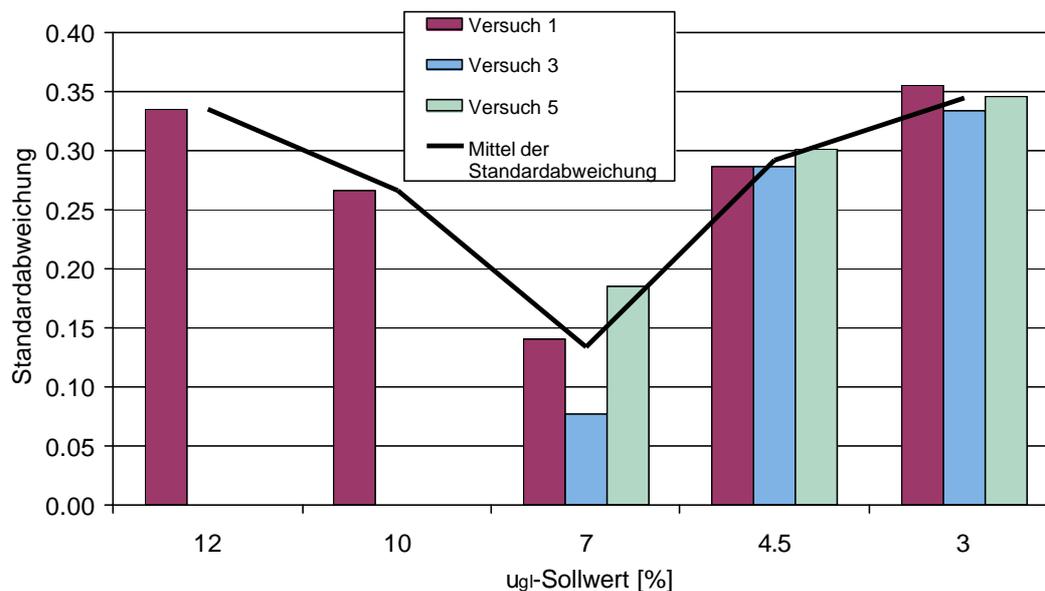
Abbildung 19: Abweichung des  $u_{gl}$ -Mittelwertes vom Sollwert bei 65°C und 70°C

### Streuung der Gleichgewichtsfeuchte

Die Schwankungen des  $u_{gl}$  für die einzelnen Feuchttestufen besitzt bei 7 % ein Minimum (Abbildung 20). Die Standardabweichung fällt von 0,33 bei  $u_{gl} = 12$  % auf 0,13 bei  $u_{gl} = 7$  %

Die erhöhte Standardabweichung des Versuches K5 auf der Feuchttestufe  $u_{gl} = 7$  % wird durch den Sprung von  $u_{gl} = 15$  % auf  $u_{gl} = 7$  % verursacht. Das verstärkte Überschwingen aufgrund des großen Sollwertsprungs wirkt sich direkt auf die Standardabweichung aus. Wird die Einschwingphase aus der Berechnung herausgefiltert, sinkt die Standardabweichung auf 0,15. Damit liegt sie in der Größenordnung der Standardabweichung der Versuche K1 und K3.

In den unteren Feuchttestufen steigen die Standardabweichungen auf 0,29 für  $u_{gl} = 4,5$  % und 0,34 für  $u_{gl} = 3$  % an. Hierbei besitzen alle Versuche annähernd die gleiche Standardabweichung. Der Anstieg ist mit der erschwerten Temperaturregelung und dem ungleichmäßigen Frischluftstrom zu erklären. Somit ist eine Abhängigkeit der Streuung von der Luftfeuchte festzustellen.



**Abbildung 20:** Standardabweichung des  $u_{gl}$  bezüglich der Feuchtestufen In Abbildung 20 für  $u_{gl} = 12\%$  und  $10\%$  sind nur die Standardabweichungen des Versuches K1 angegeben. Versuch K3 und Versuch K5 müssen in diesen Feuchtestufen gesondert betrachtet werden, da in diesem Bereich die Wechselklimaschwingungen nicht in einer Standardabweichung zusammengefasst werden können.

In Abbildung 21 sind die Standardabweichung der Versuche K3 und K5 für die einzelnen Wechselklimaphasenabschnitte dargestellt.

In die Berechnung der Standardabweichung der einzelnen Feuchtestufen des Wechselklimas sind sämtliche Daten, inklusive der Einschwingphasen eingeflossen. Die Einschwingphasen mussten für die Beurteilung der Regelungsgüte mit einbezogen werden, da sie sich über ca.  $\frac{1}{4}$  der Zeit der jeweiligen Phase erstrecken und somit das eigentliche Kriterium für die Beurteilung sind.

Die Feuchtestufe  $u_{gl} = 15\%$  besitzt die größte Abweichung. Zusätzlich kann in dieser Feuchtestufe eine Temperaturabhängigkeit der Standardabweichung festgestellt werden. Sie fällt von 1,2 bei  $65^\circ\text{C}$  auf 0,88 bei  $70^\circ\text{C}$ .

Die Verringerung der Standardabweichung kann jedoch nicht separat betrachtet werden, denn auf der Feuchtestufe  $u_{gl} = 15\%$  liegt eine deutliche Vergrößerung der Sollwertunterschreitung vor (Abbildung 19). Die Sollwertunterschreitung steigt von  $u_{gl} = 1,1\%$  bei  $65^\circ\text{C}$  auf  $u_{gl} = 1,7\%$  bei  $70^\circ\text{C}$ .

Die Feuchtestufen  $u_{gl} = 13,5\%$ ,  $10,5\%$  und  $9\%$  weisen keine Temperaturabhängigkeit auf und sind nahezu konstant.

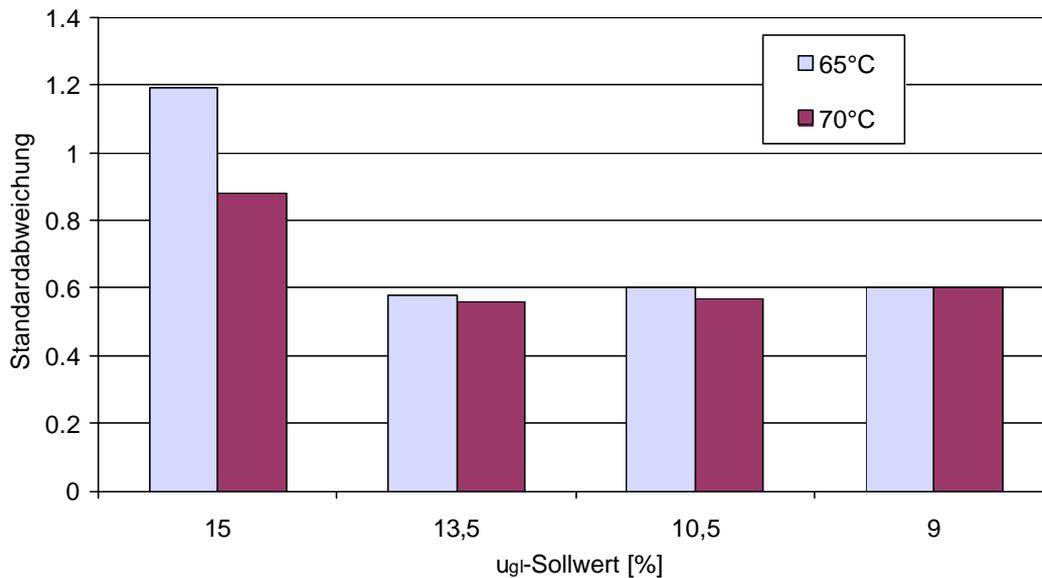


Abbildung 21: Standardabweichung des  $u_{gI}$  bezüglich der Feuchtebereiche

### 6.1.3 Schlussfolgerungen

Die eigens für die Untersuchungen des Einflusses einer Wechselklimatrocknung auf den Trocknungsablauf konzipierte Regelung hat in Laborversuchen unter Beweis gestellt, dass die Sollwertvorgaben des Trocknungsplanes in sehr engen Grenzen eingehalten werden können. Dies ist eine Voraussetzung für die Vergleiche von Konstantklima- und Wechselklimatrocknungen. Es musste sichergestellt werden, dass regelungstechnisch bedingte Klimaschwankungen gegenüber bewusst herbeigeführten Klimaschwankungen nur einen untergeordneten Einfluss haben.

Die Überprüfung der Regelgüte erfolgte an einer Labortrocknungsanlage mit sehr geringem Fassungsvermögen und einem extrem ungünstigen Verhältnis zwischen Nutzvolumen und Totraum im Trockner. Bedingt durch die geringe Trocknergröße ergibt sich ein extrem flinkes Verhalten der Trocknungsstrecke, d.h. jede kleine Veränderung der Stellglieder (Heizung, Sprühung, Klappen) führt unmittelbar zu einer Reaktion im Kammerklima. Sowohl die Sensorik als auch die Regelung reagiert ausreichend schnell, was an der hohen Regelgüte erkennbar ist.

Für die Anwendung der gleichen Regelung bei größeren Trocknern kann davon ausgegangen werden, dass wegen des insgesamt trägeren Verhaltens der Trocknungsstrecke ähnlich gute, wahrscheinlich jedoch sogar bessere Regelgenauigkeiten erzielt werden können. Das zeitlich gestreckte Einschwingverhalten von großen Trocknern wird sich ebenfalls nicht negativ, sondern eher positiv auswirken, da hierdurch schnelle Klimawechsel auf ein niedriges  $u_{gI}$ , und damit eine plötzliche starke Abtrocknung der Oberfläche vermieden wird.

## 6.2 Trocknungsdauer und Endfeuchten

Die Trocknungsdauer bei den Kieferntrocknungen bezieht sich auf die gesamte Dauer der Trocknung, von der Aufheizphase bis zu dem Moment, in dem die Zieltemperatur der Abkühlungsphase erreicht wurde. Die Zeitintervalle werden über die interne Uhr des Computers

getaktet. Bei der Speicherung einer Datenreihe wird die Zeit mitgespeichert. Dadurch ist jeder Messwert zeitlich direkt zuzuordnen.

In Tabelle 11 ist für die Kiefernrocknungen zusätzlich zu der Gesamtdauer der Trocknung noch die reine Trocknungszeit (nur Phase 3: *Trocknung*) angegeben. Zum Vergleich der Effizienz wird diese Zeitspanne benötigt, da die Phasen 1, 2, 4 und 5 bei allen Versuchen identisch sind. Für die reine Trocknung bis zum Erreichen der Zielfeuchte benötigte *Versuch K1 (Konstantklima)* 69,5 Stunden, *Versuch K2* 51,5 Stunden und *Versuch K3* 53,5 Stunden. Die reine Trocknungsdauer der Versuche K2 und K3 betrug damit nur  $\frac{3}{4}$  der Dauer des Versuches K1.

Der Vergleich zwischen Versuch K5 mit 59,1 Stunden und Versuch K6 mit 64,7 Stunden zeigt, dass die Wechselklimatrocknung K5 um 5 Stunden kürzer ist als die „Mischrocknung“ mit einem Wechsel von extremen Klimaschwankungen zu einer Konstantklimatrocknung.

Somit fielen für Kiefernholz die Wechselklimatrocknungen in beiden Versuchsreihen kürzer aus als die Konstantklimatrocknungen.

Die reine Trocknungszeit von 40,5 Stunden des Versuches K4 ist nicht mit der Trocknungsdauer der übrigen Versuche vergleichbar, da die Holzfeuchtedaten der Oberflächenelektroden mit in die Mittelwertbildung der Holzfeuchte zur Regelung eingeflossen sind. Dadurch senkt sich die Holzfeuchte, die der Regelung als Bezugsgröße dient im Mittel um 5%. Durch diese Erniedrigung wird die Trocknung zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt verschärft. Die Daten der Oberflächenelektroden wurden bewusst mit in die Holzfeuchteberechnung mit einbezogen, um eine Verschärfung des Trocknungsplans zu untersuchen. Aufgrund der deutlich geringeren Trocknungsdauer liegen auch die mittels Darrmethode ermittelten Endfeuchten über den Endfeuchten der übrigen Versuche.

Bei der elektrisch gemessenen Endfeuchte handelt es sich um die Holzfeuchte am Ende der Abkühlung auf die Zieltemperatur von 35°C. Die Abkühlung des Holzes von 60°C auf 35°C dauerte zwei Stunden. Während der Abkühlung trat eine Drift der elektrisch gemessenen Holzfeuchte von ca. +1 % auf.

	Versuche					
	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Anfangsfeuchte [%]	84	84	85	84	89	89
Zielfeuchte [%]	8	8	8	8	8	8
Endfeuchte [%]	6,2	7,1	6,2	8,3	6,4	7
Elektrisch gemessene Endfeuchte [%]	8,9	8,8	8,9	9,6	8,5	8,8
Gesamtdauer [h]	79,9	61,4	63,6	50,4	69,4	75
reine Trocknungszeit Phase 3 [h]	69,5	51,5	53,5	40,5	59,1	64,7

**Tabelle 11:** Endfeuchten der Proben und die Dauer der Trocknungsversuche mit Kiefer

Die Differenz der elektrisch gemessenen Endfeuchten und der mittels Darrproben<sup>6</sup> ermittelten Endfeuchten variierte bei den Kiefernholz-trocknungen zwischen 1,7 % und 2,7 %.

Diese Differenz entsteht durch die Drift der elektrischen Holzfeuchte von 8 % auf 8,9 % (gemittelter Wert) während der Abkühlung und einer bewusst kurzgehaltenen Dauer der Konditionierung. Im letzten Abschnitt der Trocknung wird mit einem  $u_{gl} = 3\%$  getrocknet. Dadurch werden die äußeren Bereiche des Brettes auf eine Holzfeuchte von 5 % bis 6 % heruntergetrocknet. Aufgrund der sehr kurzen Konditionierungszeit bei einem  $u_{gl} = 8\%$  sind die äußeren Bereiche des Brettes nicht ausreichend wiederbefeuchtet, wodurch eine zu niedrige Gesamtfeuchte vorliegt. Die Differenz zwischen Zielfeuchte und Endfeuchte beträgt 0,9 % bis 1,8 %.

Die Dauer der Konditionierung wurde bewusst kurz gehalten, um einen möglichen Einfluss der Wechselklimatrocknung auf die Trocknungsqualität (ausgedrückt durch Feuchteunterschiede über den Brettquerschnitt und Verschalung) ermitteln zu können. Bei langer Konditionierphase wären die Unterschiede weitgehend abgebaut worden.

### 6.3 Entfeuchtungsgeschwindigkeiten

Die Betrachtung der Entfeuchtungsgeschwindigkeit beschränkt sich auf die Versuche K1 bis K3. Versuch K4 kann aufgrund der unterschiedlichen Holzfeuchtemittelung während der Trocknung nicht mit den Versuchen K1 bis K3 verglichen werden. Versuch K5 und Versuch K6 der zweiten Versuchsreihe besaßen höhere Anfangsfeuchten und eine andere Zusammensetzung des Probenmaterials und können deshalb nur untereinander verglichen werden.

Die Entfeuchtungsgeschwindigkeit errechnet sich aus der Abnahme der Holzfeuchte bezogen auf die Dauer der Trocknung. Im Verlauf der Trocknung nimmt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit ab. Grund hierfür ist der zunehmende Einfluss der langsamen Dampfdiffusion als Transportmechanismus.

<sup>6</sup> Die Darrproben wurden 64 Stunden bei 60°C vorgetrocknet und 24 Stunden bei 103°C darrgetrocknet.

Zur Berechnung der Entfeuchtungsgeschwindigkeit wurde die Holzfeuchte, in Anlehnung an den Trocknungsplan, in einzelne Abschnitte unterteilt. In Abbildung 22 ist die Dauer, die die Trocknung zum Entfeuchten des Holzes benötigt, aufgezeigt. Zur Bestimmung der Dauer wurden die Holzfeuchtebereiche in 10 %-Schritte aufgeteilt.

Der erste Abschnitt der Trocknung setzt sich aus der Aufheizphase und der Durchwärmphase zusammen. Dieser Abschnitt ist nach fünf Stunden abgeschlossen wonach die Phase 3 beginnt. Zu diesem Zeitpunkt sind die Proben der ersten Versuchsreihe auf eine Holzfeuchte von 70 % getrocknet.

In Phase 3 unterscheiden sich die Trocknungen nur durch die  $u_{gl}$ -Sollwertvorgaben. Die unterschiedlichen Trocknungsbedingungen wirken sich direkt auf den Verlauf der Entfeuchtung aus. Obwohl alle Versuche im Mittel bei den gleichen Klimabedingungen von  $u_{gl} = 12\%$  getrocknet werden (Abbildung 18), verläuft die Entfeuchtung in Versuch 2 und Versuch 3 deutlich zügiger als in Versuch 1 (Abbildung 22). Durch die Summierung der Zeitdifferenzen wird deutlich, dass die Verkürzung der Trocknungszeit von insgesamt 17 Stunden größtenteils oberhalb Fasersättigung erfolgt. Um das Holz von 70 % auf 30 % Holzfeuchte zu trocknen verlängert sich die Trocknungsdauer im Vergleich zu den Versuchen K2 und K3 in Versuch K1 um 11,5 Stunden.

Erst ab Erreichen von Fasersättigung gleicht sich die Dauer der Entfeuchtung an. Für eine Trocknung von 30 % auf 20 % Holzfeuchte benötigen die Versuche im Mittel elf Stunden.

	Feuchtebereiche				
	70 % - 60 %	60 % - 50 %	50 % - 40 %	40 % - 30 %	
Versuch K1	3,5 h	5,5 h	7,7 h	10,8 h	
Versuche K2 und K3 (gemittelt)	1,8 h	3,4 h	4,2 h	6,6 h	
Differenz	1,7 h	2,1 h	3,5 h	4,2	<b>à 11,5 h</b>

**Tabelle 12:** Trocknungsdauer der Holzfeuchteintervalle in 10 %-Schritten (Kiefer)

In Abbildung 22 ist die Dauer der Trocknung für die Holzfeuchteintervalle in 10 %-Schritten aufgezeigt.

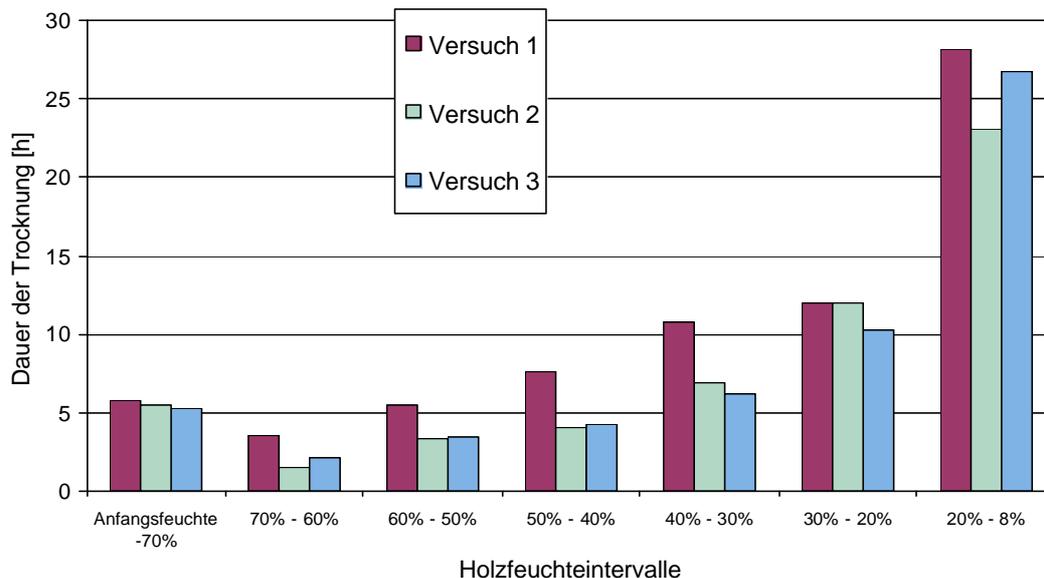


Abbildung 22: Trocknungsdauer der Holzfeuchteintervalle, Versuche K1 bis K3 (Kiefer)

Wird die Abstufung der Holzfeuchteintervalle im unteren Holzfeuchtebereich verkleinert, kann eine Aussage über die Auswirkung des Wechselklimas auf die wechselklimatefreien Abschnitte der Trocknung gemacht werden. Es wird deutlich, dass die Entfeuchtung von 10 % auf 8 % der Versuche K2 und K3 im Mittel vier Stunden früher abgeschlossen ist. In den Intervallen 20 % bis 15 % und 15 % bis 10 % kann keine Verminderung der Trocknungsdauer bei der Wechselklimatrocknung gegenüber der Konstantklimatrocknung festgestellt werden. Versuch K2 mit großer Amplitude des Wechselklimas benötigt zur Entfeuchtung im Mittel 1,5 Stunden weniger als Versuch K3.

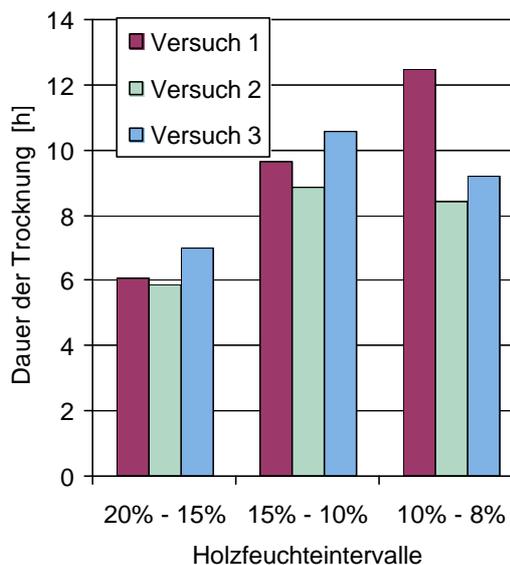


Abbildung 23: Trocknungsdauer für verschiedene Holzfeuchteintervalle (Kiefer)

Die Entfeuchtungsgeschwindigkeit errechnet sich aus der Abnahme der Holzfeuchte pro Stunde. Für die Berechnung der Entfeuchtungsgeschwindigkeit wurden die Intervallschritte auf 2 % Holzfeuchte verkleinert. Durch die höhere Datendichte können die Unterschiede der Entfeuchtungsgeschwindigkeit besser verdeutlicht werden. Bei der Betrachtung der Trocknungsdauer der einzelnen Holzfeuchteintervalle (Abbildung 22) kann kein großer Unterschied der Entfeuchtungsleistung zwischen den Versuchen K2 und K3 festgestellt werden. Aufgrund der

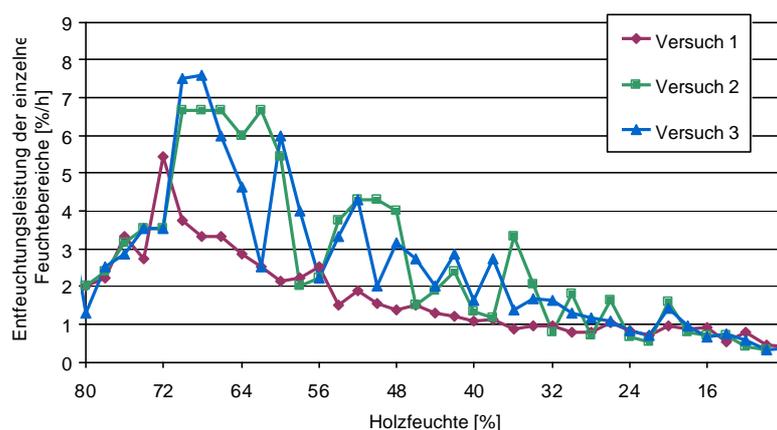
höheren Datendichte wird jedoch eine Abhängigkeit der Entfeuchtungsgeschwindigkeit von den Wechselklimabedingungen deutlich (Abbildung 24).

Versuch K1 besitzt bei 72 % Holzfeuchte ein Maximum der Entfeuchtungsgeschwindigkeit mit 5,5 %/h. Bis zum Erreichen von 15 % Holzfeuchte sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit asymptotisch auf 0,7 %/h; von 15 % bis zur Zielfeuchte von 8 % sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit auf 0,4 %/h. Die wechselnden Luftfeuchtebedingungen der Trocknungen der Versuche K2 und K3 spiegeln sich im Verlauf der Entfeuchtungsgeschwindigkeit wieder.

Versuch K2 besitzt im Bereich von 70 % bis 66 % Holzfeuchte ein Maximum der Entfeuchtungsgeschwindigkeit mit 6,7 %/h. Bei 64 % Holzfeuchte sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit auf 6 %/h um erneut auf 6,7 %/h bei einer Holzfeuchte von 62 % zu steigen. Bis zum Erreichen von 15 % sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit mit sehr deutlichen Schwankungen auf 0,8 %/h. Die Schwankungsintensität nimmt hierbei ab. Das Wechselklima in Versuch K2 durchläuft insgesamt sieben Phasen mit niedriger Luftfeuchte. In der Kurve der Entfeuchtungsgeschwindigkeit sind genau diese sieben Phasen als Peak zu erkennen. Von 15 % bis zur Zielfeuchte von 8 % sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit auf 0,4 %/h.

Versuch K3 besitzt bei 70 % Holzfeuchte ein Maximum der Entfeuchtungsgeschwindigkeit mit 7,5 %/h. Danach fällt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit auf 2,5 %/h bei 62 % Holzfeuchte. Das Wechselklima in Versuch K3 durchläuft insgesamt 13 Phasen mit niedriger Luftfeuchte. In der Kurve der Entfeuchtungsgeschwindigkeit sind jedoch nur sieben Phasen als Peak zu erkennen. Somit sind die ersten sieben Phasen genau einem Peak zuzuordnen.

Bis zum Erreichen von 15 % sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit auf 0,8 %/h. Die Schwankungsamplitude nimmt analog zu Versuch 2 im Verlauf der Trocknung ab.



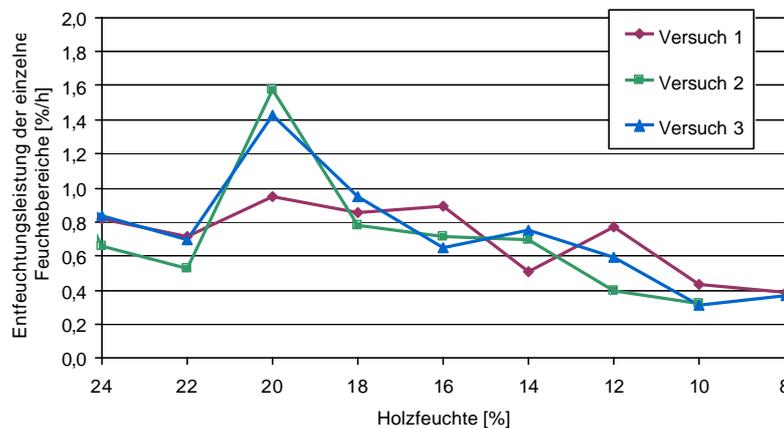
**Abbildung 24:** Entfeuchtungsgeschwindigkeit der einzelnen Holzfeuchtebereiche (80 % bis 8 %), Versuche K1 bis K3

Das Wechselklima wird beim Erreichen der Holzfeuchte von 20 % abgebrochen. Die Proben aller Versuche werden daraufhin mit einem  $u_{gl} = 7\%$  und einer Temperatur von  $75^\circ\text{C}$  getrocknet. Die genauere Betrachtung der unteren Holzfeuchtebereiche (Abbildung 25) verdeutlicht, dass das

Wechselklima auch nach Beendigung noch einen Einfluss auf das Entfeuchtungsverhalten des Holzes hat. Aufgrund der Verschärfung der Klimabedingungen erhöht sich die Entfeuchtungsgeschwindigkeit des ersten Versuches von 0,7 %/h auf 0,9 %/h. Versuch K2 reagiert wesentlich stärker auf die Verschärfung der Klimabedingungen. Nachdem bei 22 % Holzfeuchte ein lokales Minimum von 0,5 %/h erreicht wurde, steigt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit auf 1,6 %/h bei 20 % Holzfeuchte. Die Entfeuchtungsgeschwindigkeit des dritten Versuches zeigt mit einem Anstieg von 0,7 %/h auf 1,4 %/h ein analoges Verhalten zu Versuch K2.

Somit zeigt das Wechselklima auch nach seiner Beendigung noch einen positiven Einfluss auf die Entfeuchtungsgeschwindigkeit.

Die weitere Verschärfung der Trocknungsparameter hat keinen erkennbaren Einfluss auf die Entfeuchtungsgeschwindigkeit.



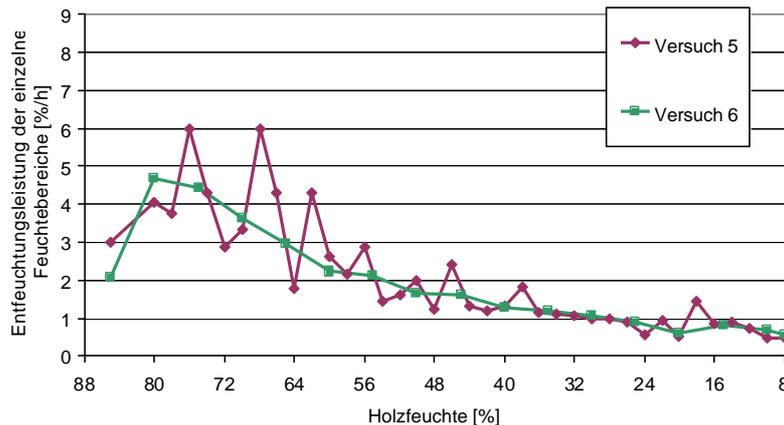
**Abbildung 25:** Entfeuchtungsgeschwindigkeit der einzelnen Holzfeuchtebereiche (24 % bis 8 %), Versuche K1 bis K3

Die Entfeuchtungsgeschwindigkeiten der Versuche K5 und K6 weisen ebenfalls einen deutlichen Unterschied der Entfeuchtungsgeschwindigkeiten analog der ersten Versuchsreihe auf.

Versuch K5 besitzt bei 78 % und 68 % Holzfeuchte ein Maximum der Entfeuchtungsgeschwindigkeit mit 6 %/h. Bis zum Erreichen von 20 % sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit mit Schwankungen auf 0,6 %/h. Die Schwankungsintensität nimmt hierbei ab. Im weiteren Verlauf der Trocknung steigt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit wieder an. Bei Erreichen einer Holzfeuchte von 18 % besitzt Versuch K5 ein lokales Maximum mit einer Entfeuchtungsgeschwindigkeit von 1,43 %/h. Bis zur Zielfeuchte von 8 % sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit auf 0,6 %/h.

Versuch K6 besitzt bei 80 % Holzfeuchte ein Maximum der Entfeuchtungsgeschwindigkeit mit 4,6 %/h. Bis zum Erreichen von 20 % Holzfeuchte sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit asymptotisch auf 0,6 %/h. Durch die Verschärfung der Trocknungsbedingungen steigt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit wieder geringfügig auf 0,81 %/h an. Ab einer Holzfeuchte von 15 % bis zum Erreichen der Zielfeuchte von 8 % sinkt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit auf 0,7 %/h.

Die Entfeuchtungsgeschwindigkeit des fünften Versuches steigt nach Beendigung des Wechselklimas im Zuge der Verschärfung der Trocknungsbedingungen an. Dabei wird die Entfeuchtungsgeschwindigkeit des sechsten Versuches deutlich überstiegen. Damit zeigt sich in Versuch 5 ebenfalls ein Einfluss des Wechselklimas auf den weiteren Verlauf der Trocknung.



**Abbildung 26:** Entfeuchtungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Holzfeuchtebereich (Versuche K5 und K6)

Die Gesamtbetrachtung der Trocknungsverläufe der ersten Versuchsreihe lässt keinen Unterschied zwischen Versuch K2 und Versuch K3 erkennen. Die Trocknung des Versuches 1 verläuft deutlich langsamer als die Trocknungen des Wechselklimas (Abbildung 27).

### Messung der Holzfeuchte

Bei allen Versuchen ist eine Erhöhung der Holzfeuchte in der Konditionierungsphase zu erkennen. Die Konditionierphase bei Versuches K1 setzt nach 75 Stunden, bei Versuch 2 nach 56,5 Stunden und bei Versuch 3 nach 58,5 Stunden ein.

Während der Dauer der Konditionierung erhöht sich die Gesamtholzfeuchte von 6,5 % auf 8 %. In der Darstellung der elektrisch gemessenen Holzfeuchte (Abbildung 28) ist dieser Anstieg nicht zu erkennen, da die Holzfeuchtwerte der Oberflächenelektroden nicht mit in die Mittelwertbildung eingeflossen sind und eine Feuchteaufnahme während der Konditionierung nur in den oberflächennahen Schichten erfolgt.

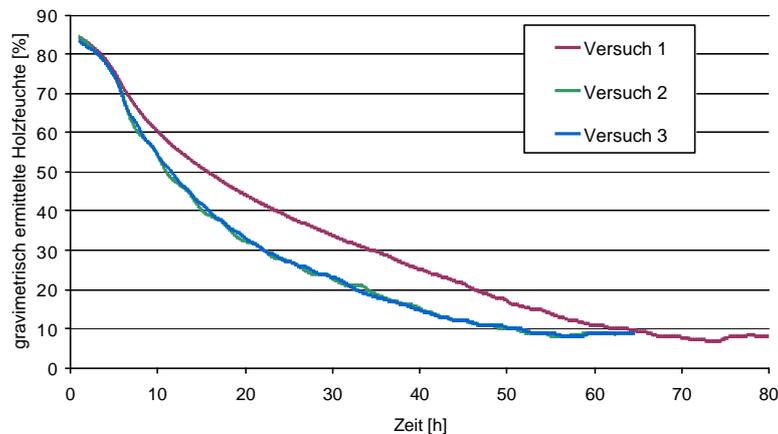


Abbildung 27: Verläufe der gravimetrisch ermittelten Holzfeuchten. Versuch K1 bis K3 (Kiefer)

Zu Beginn der Trocknung zeigt der Verlauf der elektrisch gemessenen Holzfeuchte einen charakteristischen Peak (Abbildung 28). Die „gemessene“ Holzfeuchte des ersten Versuches steigt im Zuge der Erwärmung des Holzes auf 80 %, die Holzfeuchte der Versuche K2 und K3 steigt auf 65 %, obwohl eine Temperaturkompensation durch ein in die Mitte eines Probenbrettes angebrachtes Thermometer durchgeführt wurde. Die in diesem Bereich der Holzfeuchte gewonnenen Daten stimmen nicht mit den real vorliegenden Holzfeuchten überein. Jedoch stimmt der Trend der elektrisch ermittelten Entfeuchtung mit der gravimetrisch bestimmten Holzfeuchte überein. Erst ab Fasersättigung gleichen sich die elektrisch gemessene Holzfeuchte und die mittels Wägung errechnete Holzfeuchte an.

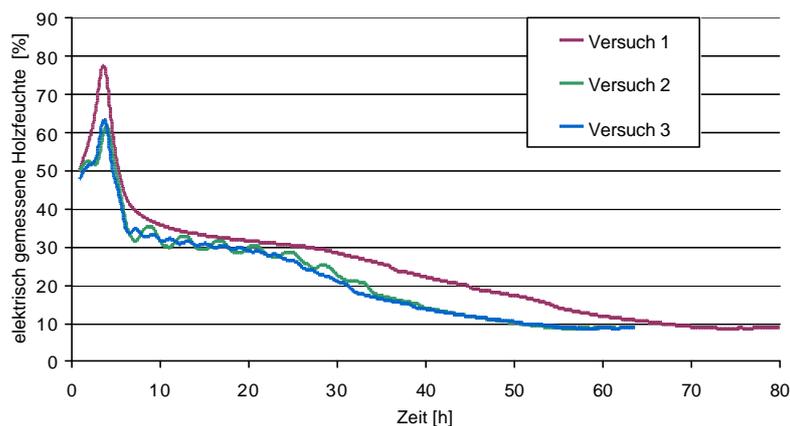
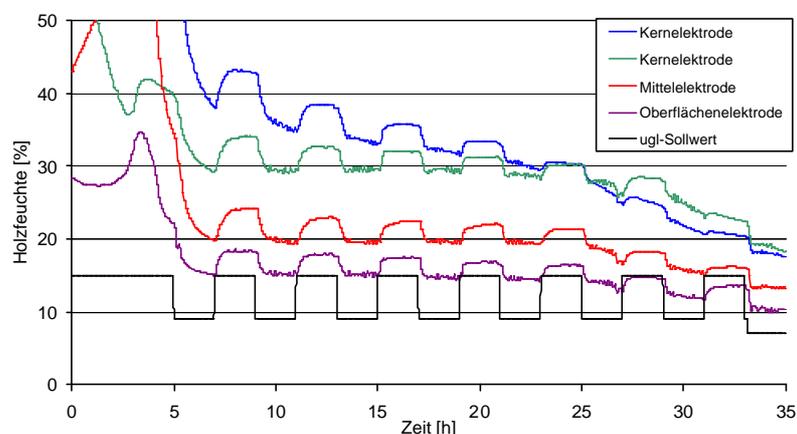


Abbildung 28: Verläufe der elektrisch gemessenen Holzfeuchten. (Versuch K1 bis K3)

Die durch das Wechselklima bedingte Schwankung der rel. Luftfeuchte wirkt sich direkt auf die elektrisch gemessene Holzfeuchte aus. Diese Besonderheit der elektrischen Holzfeuchtebestimmung trat nur bei wechselnden Klimabedingungen auf. Obwohl keine phasenabhängige Änderung der Holzfeuchte zu erwarten war, schwankten die elektrisch gemessenen Feuchtwerte mit der gleichen

Frequenz wie die der relative Luftfeuchte. Dabei hob und sank die Feuchte anfangs um 5 %. Mit Abnahme der Holzfeuchte verringert sich die Schwankungsamplitude auf 2 %. Den gleichen Effekt beobachtete Dreiner in seiner Versuchsanlage (DREINER 1991). Da die Luftfeuchteschwankungen bei konstanter Temperatur erfolgten, scheidet eine fehlerhafte Temperaturkompensation aus. Eine nicht ausreichende Isolation der Holzfeuchtemesselektroden scheidet ebenfalls aus, da auch während der Schwankungen die Absolutdifferenz zwischen Oberflächenelektrode und Kernelektrode konstant blieb. Im Falle einer Überbrückung durch die obersten Holzschichten müssten alle Elektroden die gleiche Feuchte messen. Diese Schwankungen traten nicht in der gravimetrisch bestimmten Holzfeuchte auf. In Abbildung 29 ist der Bereich der Klimaschwankungen des Versuches 2 abgebildet. Die Luftfeuchte schwankt mit einer Amplitude von  $\pm 3\% u_{gl}$  um den Mittelwert von  $12\% u_{gl}$ .



**Abbildung 29:** Phasengleiche Schwankungen der Luft- und Holzfeuchte in Versuch K2

Eine mögliche Erklärung für die beobachteten Schwankungen der elektrisch ermittelten Holzfeuchte ergibt sich, wenn die Auswirkungen von zwei voneinander unabhängiger Phänomene kombiniert werden.

#### 1) Psychrometrischer Effekt

Trocknende Bretter mit einer Holzfeuchte weit oberhalb Fasersättigung verhalten sich ähnlich wie der Feuchtstrumpf eines Psychrometers. Wird das  $u_{gl}$  des Trocknungsmediums sprunghaft erniedrigt, so ergibt sich daraus eine verstärkte Abkühlung der Brettoberfläche, die sich zeitlich verzögert über den gesamten Querschnitt auswirkt. Die Holztemperatur zur Kompensation des Temperatureinflusses auf die elektrische Holzfeuchtemessung wurde jedoch in Brettmitte gemessen, also dort wo die Temperatur am langsamsten absinkt. Hierdurch wird die Temperaturkompensation mit einem im Mittel zu hohen Temperaturwert gespeist. Die Folge ist Ansteigen der resultierenden Holzfeuchte.

#### 2) Unsicherheit der Temperaturkompensation bei Holzfeuchten oberhalb Fasersättigung

Die elektrische Holzfeuchtemessung ist im Bereich oberhalb Fasersättigung bekanntermaßen recht unzuverlässig. Diese unzuverlässigen Messwerte werden darüber hinaus zusätzlich temperaturkompensiert. Die Temperaturkompensationsfunktionen wurden jedoch für den Holzfeuchtebereich zwischen ca. 8% und 22% entwickelt. Für den hohen Holzfeuchtebereich wird extrapoliert. Über die

Zulässigkeit einer solchen Extrapolation konnten in der Literatur keinerlei Angaben gefunden werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass im hohen Holzfeuchtebereich bereits geringe Temperaturunterschiede zu beträchtlichen Signaländerungen führen.

Die elektrisch ermittelte Holzfeuchte oberhalb Fasersättigung sollte deshalb mit großer Vorsicht interpretiert und nach Möglichkeit nicht für Anpassungen des Trocknungsregimes verwendet werden. Dieser Forderung entsprechen die derzeit in der Praxis verwendeten konventionellen holzfeuchteabhängigen Trocknungsfahrpläne dadurch, dass oberhalb Fasersättigung mit weitgehend konstanten Trocknungsbedingungen gearbeitet wird. Erst bei Erreichen von Fasersättigung, wenn die elektrische Holzfeuchtemessung verlässliche Ergebnisse liefert, werden die Trocknungsbedingungen verschärft.

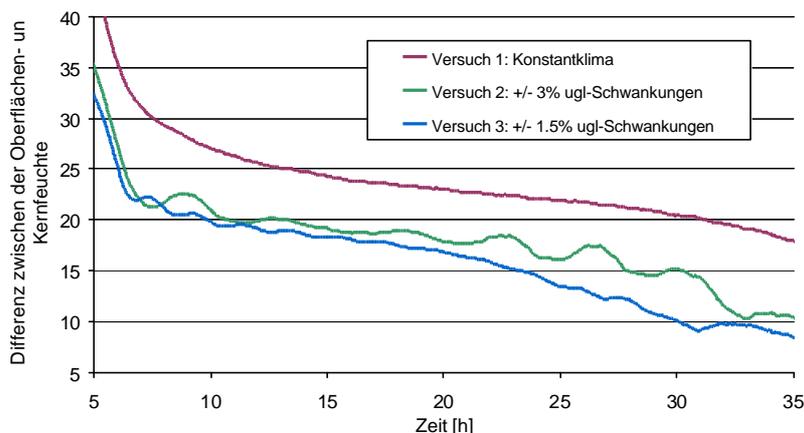
#### **6.4 Holzfeuchteverteilung über die Brettstärke**

In die Probenbretter der Trocknungen wurden Elektroden in drei Tiefen eingebracht (Abbildung 15). Ein Ziel der Wechselklimatrocknung besteht darin, die Verteilung der Feuchte im Brett zu beeinflussen. Es wird angestrebt den Feuchtegradienten zu verringern, so dass eine homogenere Verteilung der Feuchte über den Brettquerschnitt erreicht wird. Im Verlauf der Trocknung wird bei einer Verringerung des Feuchtegradienten mehr Feuchte aus dem Innenbereich des Brettes in die mittleren und äußeren Brettschichten transportiert. Eine homogenere Verteilung der Feuchte wirkt sich positiv auf die Spannungen im Brett und auf den Feuchtetransport aus.

Um die Trocknungen miteinander vergleichen zu können, müssen die individuellen Unterschiede jeder Trocknung ausgeglichen werden. Dies wird durch die Bildung der Differenzholzfeuchte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode erreicht. Die einzelnen Trocknungen können durch den so ermittelten Feuchtegradienten miteinander verglichen werden.

In Abbildung 30 ist die Differenzholzfeuchte der Oberflächenelektrode und der Kernelektrode der Versuche K1 bis K3 dargestellt. Die Differenz des Versuches K1 liegt deutlich über den Differenzen der Versuche K2 und K3. Der schwingende Verlauf des Versuches K2 entsteht durch die höheren Klimaschwankungen während der Trocknung. In den Phasen mit hoher Luftfeuchte verringert sich die Differenz der erhaltenen Holzfeuchtwerte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode aufgrund der höheren Holzfeuchte in den äußeren Brettschichten. In den Phasen mit niedriger Luftfeuchte trocknen zuerst die äußeren Brettschichten und die Differenz vergrößert sich. Zusätzlich wirken sich die im vorausgegangenen Kapitel beschriebenen Phänomene aus.

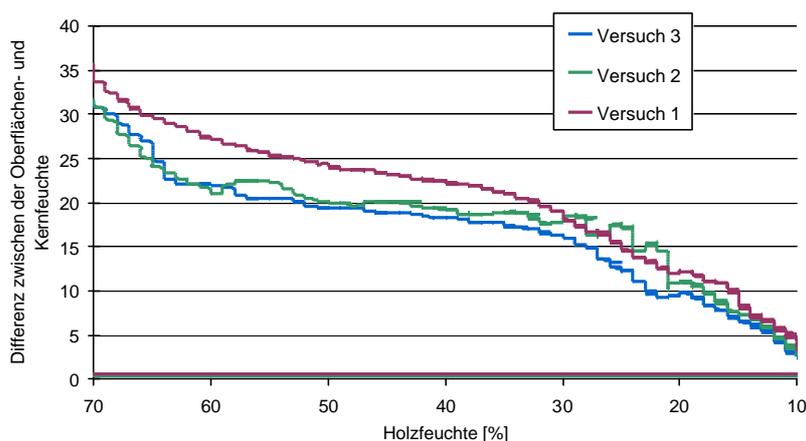
Versuch K3 zeigt die geringste Differenz während des Trocknungsverlaufs. Nach zehn Stunden Trocknungsdauer liegt ein Feuchtegradient von 20 % vor. Nach 30 Stunden hat sich der Feuchtegradient auf 10 % verringert. Versuch 1 hingegen erreicht erst nach 30 Stunden einen Feuchtegradienten von 20 %. Ein Feuchtegradient von 10 % stellt sich sogar erst nach 52 Stunden ein.



**Abbildung 30:** Differenz der Holzfeuchte zwischen Oberfläche und Brettmitte (Versuche K1 bis K3)

Wird die Differenz der Holzfeuchte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode über die Holzfeuchte dargestellt, entfällt der zeitliche Aspekt der Trocknung. Bei dieser Art der Datenauswertung werden die Differenzen der jeweiligen Holzfeuchte zugeordnet. Die über Gewichtsabnahme berechnete Holzfeuchte wird problematischerweise nur in ganzen Prozenten gespeichert. Somit sind einer Holzfeuchte eine Vielzahl von Differenzen zugeordnet. Bei der Darstellung mittels Zeitachse besteht dieses Problem nicht. Hier ist die errechnete Differenz direkt einem Zeitpunkt zugeordnet.

In Abbildung 31 ist die Differenz der Holzfeuchte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode der Versuche K1 bis K3 über die Holzfeuchte dargestellt. Der Zeitgewinn der Versuche K2 und K3 gegenüber Versuch K1 fließt nicht mehr in die Darstellung ein. Im Holzfeuchtebereich von 70 % bis 30 % liegen die Differenzen der Wechselklimatrocknungen unter den Differenzen der Konstantklimatrocknung. Die Schwankungen im Verlauf des Versuches 2 sind in dieser Darstellung ebenfalls zu erkennen. Im Feuchtebereich von 30 % bis 20 % übersteigen die Differenzen des Versuches K2 phasenweise die Differenzen des Versuches 1. Unterhalb 20 % Holzfeuchte sind die Differenzen nahezu identisch.

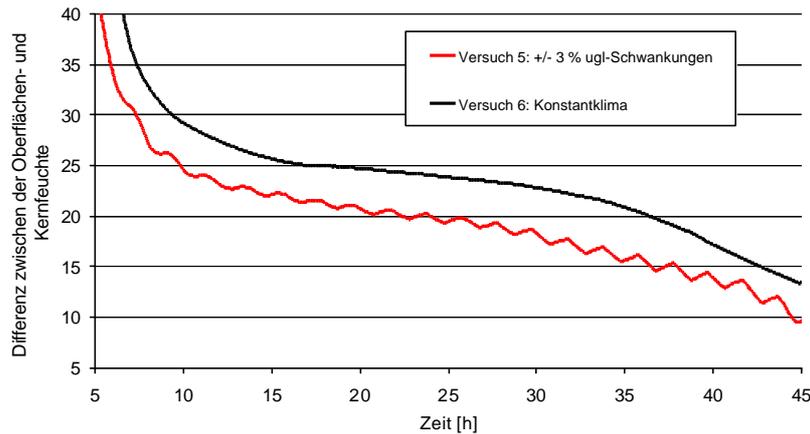


**Abbildung 31:** Differenz der Holzfeuchte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode der Versuche K1 bis K3 (Kiefer), Darstellung über die Holzfeuchte

In Abbildung 32 ist die Differenzholzfeuchte der Oberflächenelektrode und der Kernelektrode der Versuche K5 und K6 über die Zeit dargestellt. Die Differenz des Versuches K6 liegt deutlich über der

Differenz des Versuches K5. Der schwingende Verlauf des Versuches K5 entsteht durch die Klimaschwankungen während der Trocknung.

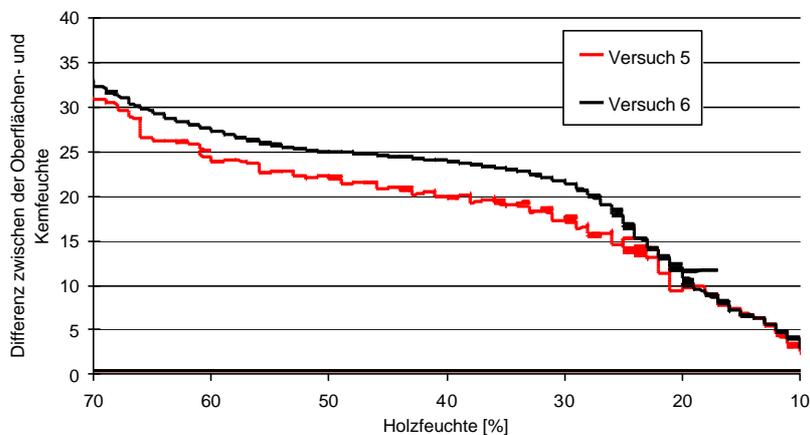
In Versuch K5 liegt nach 21 Stunden Trocknungsdauer ein Feuchtegradient von 20 % vor. Nach 36 Stunden hat sich der Feuchtegradient auf 15 % verringert. Versuch K6 hingegen erreicht erst nach 36 Stunden einen Feuchtegradienten von 20 %. Ein Feuchtegradient von 15 % stellt sich sogar erst nach 43 Stunden ein.



**Abbildung 32:** Differenz der Holzfeuchte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode der Versuche K5 und K6 (Kiefer), Darstellung über die Zeit

In Abbildung 33 ist die Differenzholzfeuchte der Oberflächenelektrode und der Kernelektrode der Versuche K5 und K6 über die Holzfeuchte dargestellt. Auch bei den Versuchen der zweiten Versuchsreihe liegen die Differenzen der Wechselklimatrocknung unter den Differenzen der Konstantklimatrocknung. Die Schwankungen der Klimabedingungen sind im Kurvenverlauf des Versuches K5 in abgeschwächter Form zu erkennen. Unterhalb 20 % Holzfeuchte sind die Differenzen nahezu identisch.

Somit liegt bei allen Versuchen mit Wechselklimatrocknung die Differenzholzfeuchte der Oberflächenelektrode und der Kernelektrode unter der Differenzholzfeuchte der Konstantklimatrocknung.



**Abbildung 33:** Differenz der Holzfeuchte von Oberflächenelektrode und Kernelektrode der Versuche K5 und K6, Darstellung über die Holzfeuchte

## 6.5 Qualität des Holzes hinsichtlich Verschalung und Trocknungsfehler

Ziel einer Schnittholz-trocknung ist es, die Anforderungen an die Trocknungsqualität innerhalb einer möglichst kurzen Zeit zu erfüllen. Ein Qualitätsverlust aufgrund einer unsachgemäßen Trocknung führt zur Wertminderung bis hin zum völligen Wertverlust des Holzes.

Eine zu scharfe Trocknung erhöht die Spannungen im Holz. Überschreiten die auftretenden Spannungen die Festigkeiten, kommt es zur Rissbildung. Risse sind ein Indiz für eine zu scharfe Trocknung.

Bei den durchgeführten Versuchen sind weder Oberflächenrisse noch Innenrisse aufgetreten.

Ein Maß für die im Holz aufgebauten Spannungen sind die Formänderungen von Verschalungsproben aufgrund freigesetzter Eigenspannungen. Sie wurden nach der im CEN-Normenentwurf prENV 175-091 – *Round and sawn timber –Method for assessment of casehardening* (letzte Fassung 8/2000)“ beschriebenen Methode bestimmt. Hierbei wird aus der Mitte des Brettes ein 1,5 cm breiter Querriegel entnommen und parallel zur Oberfläche mittig aufgetrennt. Nach 24-stündiger Klimatisierung wird die Deformation der Mittenschnittproben mittels digitaler Schublehre gemessen. Die Verschalungsproben der Versuche K1 - K6 wiesen eine mäßig bis starke Verschalung auf (Einstufung in Anlehnung an die Charakterisierung des Verschalungsgrades nach EDG-Richtlinie Trocknungsqualität (1994)). Bei der Betrachtung der Verschalung muss jedoch die sehr kurze Konditionierungsdauer während der Trocknung beachtet werden. Die Konditionierung bewirkt eine Wiederbefeuchtung der während der Trocknung untertrockneten äußeren Brettschichten. Hierdurch kommt es zu einer Quellung der oberflächennahen Schichten und die Verschalung wird reduziert. Die Konditionierungsphase wurde bewusst auf drei Stunden beschränkt, um eventuell vorhandene Unterschiede bezüglich der Verschalung eindeutig nachweisen zu können.

	Versuche				
	K1	K2	K3	K5	K6
Verschalung [mm]	2,5	2,9	2,8	3,0	3,3
Standardabweichung	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3

**Tabelle 13:** Verschalung der Proben und die Standardabweichung der Verschalung (Kiefer)

Die bei den verschiedenen Kiefern-trocknungen festgestellten Verschalungszustände weisen keinen deutlichen Unterschied auf. Bedingt durch den geringen Stichprobenumfang sind Unterschiede statistisch nicht gesichert, können aber als Tendenz für die Auswertung herangezogen werden.

Berücksichtigt man jedoch, dass die Wechselklimatrocknungen bei etwa gleicher Verschalung wesentlich schneller verlaufen sind als die Konstantklimatrocknungen, dann lässt sich daraus ein erhebliches Potential für Trocknungszeitverkürzungen ableiten.

Im Rahmen weiterführender Versuche in größerem Maßstab mit Fichtenschnittholz sowie in zusätzlichen Versuchen mit starkem Buchenschnittholz sollten die für Kiefernspiltholz festgestellten Tendenzen bestätigt werden.

Bei den Kiefernspiltholztrocknungen traten keine trocknungsbedingten makroskopischen Deformationen wie Schüsseln und Verdrehungen auf. Dies war auch nicht zu erwarten, da es sich bei dem Versuchsmaterial um ausgesuchte fehlerfreie Bretter mit weitgehend liegendem Jahrringverlauf handelte. Bei einigen Brettern kam es zu partiellem Harzaustritt, der aus den Trocknungstemperaturen oberhalb 65°C gegen Ende der Trocknung resultiert.

## **6.6 Ergebnisse der Buchenholztrocknungen**

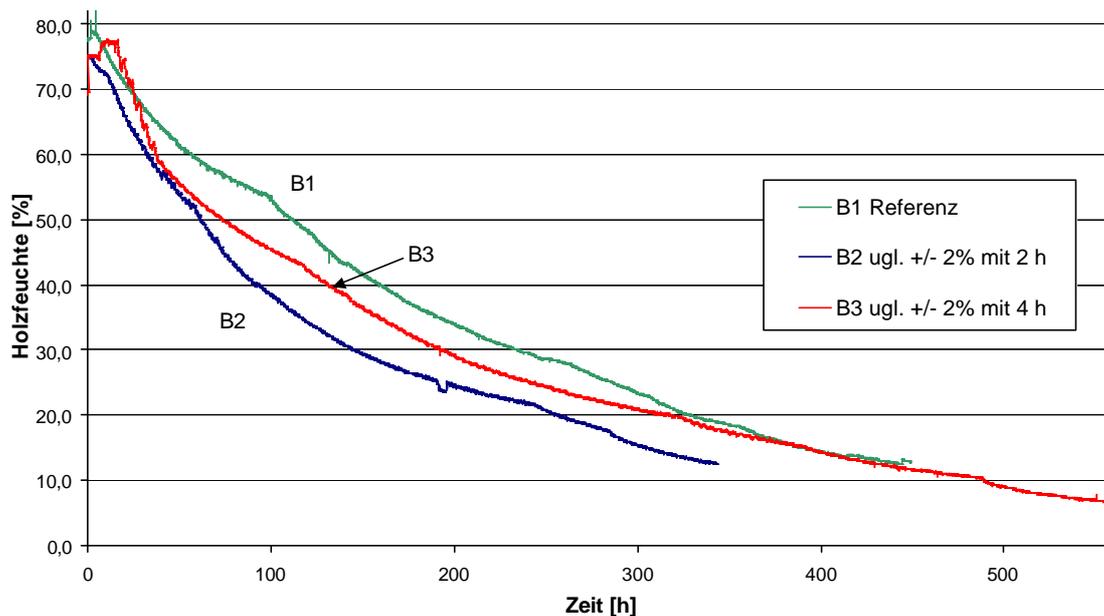
Aus Tabelle 14 und Abbildung 34 über die Verläufe der Buchenholztrocknungen B1 bis B3 wird ersichtlich, dass sowohl die Anfangsfeuchte als auch die Endfeuchten der drei Trocknungen unterschiedlich waren. Die Trocknungen B1 (Referenz) und B3 (Wechselklima) wiesen zwar in etwa die gleiche Anfangsfeuchte auf, unterschieden sich jedoch in der Endfeuchte. Trocknung B1 und B2 weisen in etwa die gleiche Endfeuchte auf, jedoch differiert die Anfangsfeuchte um 7%. Die reinen Trocknungszeiten von 433 h (B1), 351 h (B2) und 559 h (B3) können deshalb nicht direkt miteinander verglichen werden.

Um die Trocknungen trotzdem hinsichtlich des Einflusses des Wechselklimas auswerten zu können, wurden verschiedene Feuchteintervalle und die zur Durchschreitung dieser Feuchteintervalle benötigte Zeit betrachtet.

	Versuche		
	B1	B2	B3
Anfangsfeuchte [%]	77,6	70,6	77,3
Zielfeuchte [%]	12	12	12
Endfeuchte [%]	12,5	11,4	6,6
Elektrisch gemessene Endfeuchte [%]	14,4	13,9	8,8
Gesamtdauer [h]	449	382	576
reine Trocknungszeit Phase 3 [h]	433	351	559
zusätzliche Konditionierung [h]	20	20	20

**Tabelle 14:** Endfeuchten der Proben und die Dauer der Trocknungsversuche mit Buche

Verlauf der 3 Buchentrocknungen

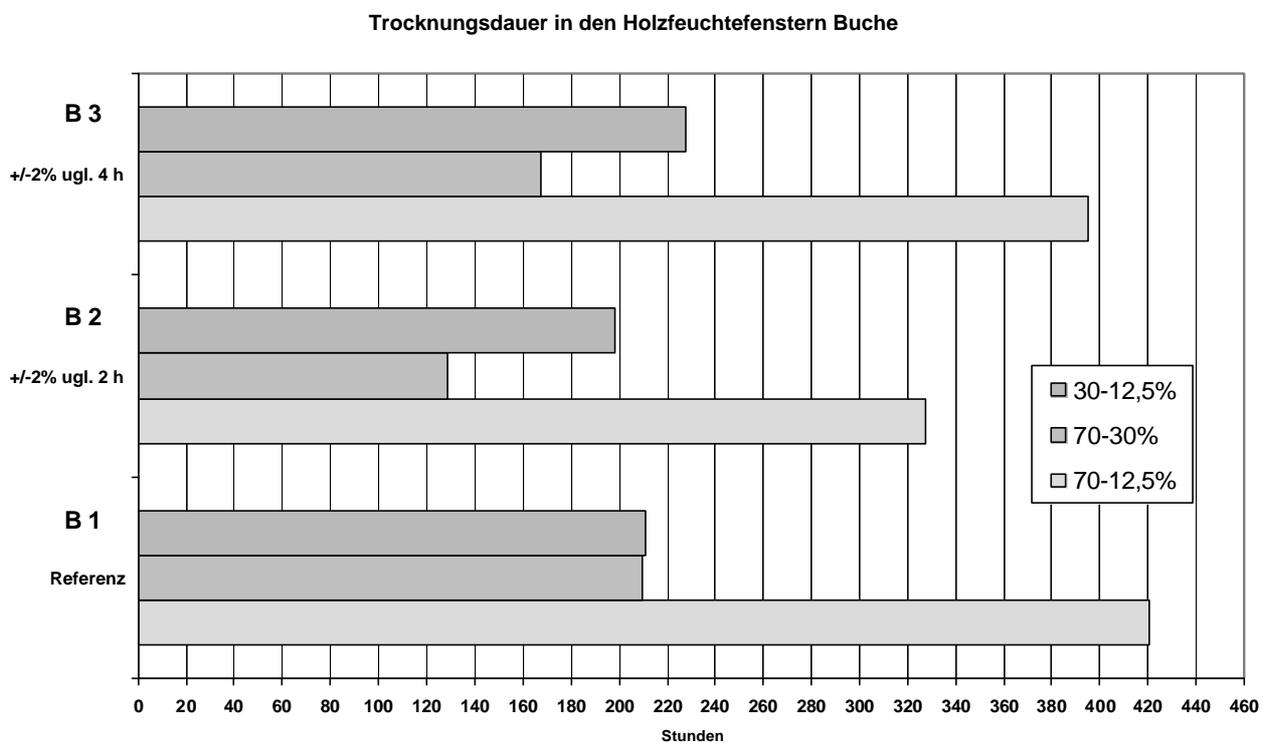


**Abbildung 34:** Trocknungsverlauf der Buchentrocknungen B1- B3

Die Verweildauer der Trocknungen im Bereich oberhalb Fasersättigung ( $u = 70\% - 30\%$ ) zeigt, dass die Referenz Trocknung B1 mit 210 h deutlich mehr Zeit benötigte als die Wechselklimatrocknungen B2 (129 h) und B3 (167 h).

Auch im Feuchtebereich unterhalb Fasersättigung wirkt sich die Wechselklimatrocknung noch leicht positiv aus. Bei beiden Wechselklimatrocknungen liegt die Trocknungsdauer mit 198 h (B2) und 227 h (B3) unter bzw. in der gleichen Größenordnung wie die Referenz Trocknung B1 mit 210 h.

Bei allen 3 Buchentrocknungen wurde mit einer Anfangsgleichgewichtsfeuchte von  $u_{gl} = 19\%$  eine sehr milde Trocknungsbedingung gewählt. Durch die Überlagerung von 2-stündigen  $\pm 2\%$   $u_{gl}$  Klimaschwingungen bei Trocknung B2 und 4-stündigen Klimaschwingungen bei Trocknung B3 wurden Phasen mit extrem hohem  $u_{gl}$  von 21% erzeugt, in denen kaum eine Trocknung stattgefunden haben dürfte. Dies wurde durch die Trocknung mit einem  $u_{gl}$  von 17% mehr als ausgeglichen. Zur Durchschreitung des gesamten vergleichbaren Feuchteintervalls von 70% auf 12,5% Feuchte benötigte die Referenztrocknung B1 420 h, die Wechselklimatrocknung B2 327 h und die Trocknung B3 395 h.



**Abbildung 35:** Dauer von vergleichbaren Trocknungsintervallen bei den Buchenholz-trocknungen B1 - B3

Beim Vergleich der Verschalungszustände fällt auf, dass bei der Referenz-trocknung B1 ein vergleichsweise hoher Verschalungsgrad von 3,6 mm Spaltöffnung vor der Konditionierung (2,5 mm nach Konditionierung) im Vergleich zu den Wechselklimatrocknungen mit 0,8 (0,7) bei B2 und 0,7 (1,2) bei B3 auftrat. Dies deckt sich nicht mit den bei den Kiefernholz-trocknungen gewonnenen Erfahrungen. Hier wiesen die Wechselklimatrocknungen leicht erhöhte Verschalungsgrade im Vergleich mit den Referenz-trocknungen auf. Offensichtlich wirken sich die Wechselklimabedingungen bei den mit 60 mm wesentlich größeren Brettdicken bei den Buchenholz-trocknungen positiver aus als bei den geringen Brettdicken von 30 mm beim Kiefernholz.

Schwierigkeiten bereitet die Interpretation des Anstiegs des Verschalungsgrades bei Trocknung B3 nach der Konditionierung. Eigentlich hätte die Verschalung noch weiter zurückgehen müssen. Am

wahrscheinlichsten ist, dass die Mittenschnittmethode bei geringen Verschalungsgraden mit Spaltöffnungen unter bzw. in der Nähe von 1 mm an ihre Grenzen hinsichtlich der Genauigkeit stößt.

	Versuche		
	B1	B2	B3
Verschalung [mm] vor Konditionierung	3,6	0,8	0,7
Standardabweichung	0,3	0,5	0,3
Verschalung [mm] nach Konditionierung	2,5	0,7	1,2
Standardabweichung	0,2	0,5	0,1

**Tabelle 15:** Verschalung der Proben und die Standardabweichung der Verschalung (Buche)

### Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sowohl bei den Kiefernholz- als auch bei den Buchenholz- trocknungen die Wechselklimatrocknungen schneller verliefen als die entsprechenden Referenz- trocknungen mit gleichen mittleren  $u_{gl}$ -Bedingungen. Während bei allen Kiefernholz- trocknungen in etwa die gleichen Trocknungsqualitäten hinsichtlich des Verschalungsgrades erreicht wurden, wurden bei den Buchenholz- trocknungen mit der Wechselklimatrocknung wesentlich bessere Trocknungsqualitäten erzielt.

## 6.7 Diskussion

Im Zuge der bisherigen Projektarbeit ist es gelungen eine Regelung zu entwickeln, die dem Benutzer eine individuelle Gestaltung des Trocknungsplans ermöglicht. Die frei variierbaren Trocknungsparameter sind die Temperatur,  $u_{gl}$ , Klimaschwankungen mit beliebiger Amplitude und Phasenlänge. Des weiteren kann die Regelung durch die Offenlegung der PID-Regelungsroutine an jede thermische und thermodynamische Trägheit einer Trocknungsanlage angepasst werden.

Das entwickelte Programm ist in der Lage die Trocknungen zu dokumentieren. Dadurch lässt sich der Einfluss der gewählten Trocknungsparameter nachträglich analysieren wodurch nachfolgende Trocknungen zielgerichtet optimiert werden können. Die Analyse der Trocknungsdaten ergab, dass die Regelung die Sollwertvorgaben der Konstantklimatrocknung und die der Wechselklimatrocknung sehr präzise erfüllt.

### 6.7.1 Einfluss des Wechselklimas auf die Trocknungsdauer

Bei der Betrachtung der Trocknungsdauer müssen die Versuchsreihen 1 (K 1-3) und 2 (K 4-5) aufgrund der unterschiedlichen Anfangsfeuchten separat analysiert werden.

Die Trocknungsdauer der Versuche K2 und K3 mit Wechselklimaphasen war im Mittel 17 Stunden kürzer als die Trocknungsdauer der Konstantklimatrocknung (Versuch K1). Der Versuch K2 (kleine Amplitude der Klimaschwankungen) unterschritt die Trocknungsdauer des Versuches K3 um zwei Stunden. Der Versuch K4 wies mit drei bis vier Phasenwechsel der Luftfeuchtigkeit pro Stunde die geringste Dauer mit 50,4 Stunden auf. Bei dieser Trocknungszeit ist jedoch die frühzeitige Verschärfung des Trocknungsplans zu beachten. Die Dauer der Wechselklimatrocknung des Versuches K5 unterschreitet die Dauer der „Mischrocknung“ K6 um fünf Stunden (Tabelle 11).

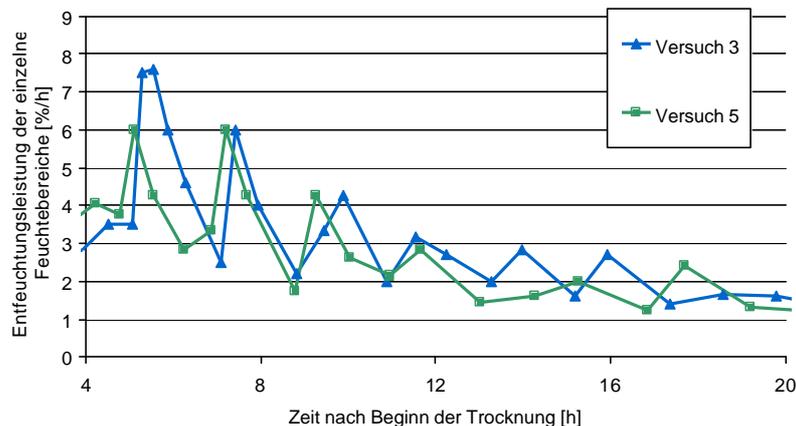
Insgesamt liegt bei 30 mm starkem Kiefernholz die Dauer der Wechselklimatrocknungen unter der Dauer der Konstantklimatrocknungen. Somit ist ein positiver Effekt auf die Trocknungsdauer festzustellen.

Bei der Trocknung von 60 mm Buchenbohlen liegen die Verhältnisse ähnlich. Eine nennenswerte Zeitersparnis ergibt sich hier jedoch nur im Bereich oberhalb Fasersättigung. Bei den Versuchen mit Buchenholz besteht jedoch sicherlich ein beträchtliches Potential für Verbesserungen, zumal die Wechselklimatrocknungen hinsichtlich der Verschalung ein wesentlich besseres Ergebnis erzielten. Das bedeutet, dass unterhalb Fasersättigung die Schärfe der Trocknung hätte verstärkt werden können, ohne dass eine schlechtere Trocknungsqualität als bei der Referenzrocknung erzielt worden wäre.

Die Entfeuchtungsgeschwindigkeit leitet sich aus der Trocknungsdauer ab. Der Einfluss wechselnder Luftfeuchtigkeit auf die Entfeuchtungsgeschwindigkeit konnte direkt nachgewiesen werden (Abbildung 24 und Abbildung 26).

Der Vergleich der Entfeuchtungsgeschwindigkeit von Versuch K3 und Versuch K5 zeigt, dass die Erhöhung der Amplitude in den Bereichen mit sehr hoher Holzfeuchte keine Verbesserung der Entfeuchtungsgeschwindigkeit bewirkt. Werden die beiden Versuche über die Dauer der Trocknung

aufgetragen, so ergeben sich nahezu identische Entfeuchtungsgeschwindigkeiten in den ersten zwölf Stunden der Trocknung. Für die Buchentrocknungen kann hierzu keine Aussage gemacht werden, da die beiden Wechselklimatrocknungen mit gleicher Amplitude ( $\pm 2\% u_{gl}$ ) gefahren wurden.



**Abbildung 36:** Vergleich der Entfeuchtungsgeschwindigkeit von Versuch K3 und Versuch K5

Somit hängt die Entfeuchtungsgeschwindigkeit primär von der Phasenlänge des Klimawechsels ab.

Vergegenwärtigt man sich einmal, was mit der Holzoberfläche unter Wechselklimabedingungen geschieht, dann kann festgestellt werden, dass Klimaänderungen im schnellen Wechsel über die gesamte Trocknungszeit bedeuten, dass insgesamt mehr Wechselklimaphasen durchlaufen werden. Offensichtlich wirken sich die kurzen Frequenzen stärker auf eine Beschleunigung der Trocknung aus als lange Frequenzen. Eine physikalische Erklärung hierfür kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht gegeben werden. Im Rahmen von weiterführenden Untersuchungen soll unter Zuhilfenahme von Simulationsrechnungen geklärt werden, ob sich durch die kurzen Frequenzen andere Feuchteverteilungen über den Brettquerschnitt und damit eventuell eine Verschiebung der Triebkräfte für die Feuchtebewegung im Holz nachweisen lässt.

Die Vergrößerung der Amplitude bewirkt nur bei gleichzeitiger Erhöhung der Phasenlänge eine Verbesserung der Entfeuchtungsgeschwindigkeit (Vergleich von Versuch K2 und K5). Dieser positive Effekt kehrt sich jedoch ab etwa 46 % Holzfeuchte in den Phasen mit hoher Luftfeuchte um. Die Entfeuchtungsgeschwindigkeit fällt phasenweise unter die Geschwindigkeit der Trocknung mit kleiner Phasenlänge. Dieses bedeutet, dass der Feuchtetransport zeitverzögert einsetzt und über die Dauer intensiviert wird.

Ein eindeutig positiver Effekt konnte bei der Verschärfung der Trocknungsbedingungen im Anschluss an die Wechselklimaphase festgestellt werden. In allen drei Wechselklimatrocknungen verdoppelte sich die Entfeuchtungsgeschwindigkeit. Bei den Konstantklimatrocknungen hingegen kam es im Zuge der Verschärfung nur zu einer marginalen Steigerung der Entfeuchtungsgeschwindigkeit (Abbildung 24 und Abbildung 26).

### 6.7.2 Einfluss des Wechselklimas auf die Feuchteverteilung

Bei der Betrachtung der Feuchteverteilung (Abbildung 31 und Abbildung 33) ist eine eindeutige Verbesserung der Wechselklimatrocknung gegenüber der Konstantklimatrocknung festzustellen. Die Differenz der Holzfeuchte zwischen Kernelektrode und Oberflächenelektrode lag in allen Versuchen der Wechselklimatrocknung unter der Differenz der Konstantklimatrocknung.

Versuch K3 zeigte die geringste Differenz. Die Vergrößerung der Amplitude der Klimaschwingungen bewirkte keine Verbesserung (Versuch K5). Bei einer Vergrößerung der Amplitude, gekoppelt mit einer Phasenverlängerung, kehrt sich ab Fasersättigung der positive Effekt dieser Schwankungsmodulation sogar um. Die Differenzen (Versuch K2) überstiegen die Differenzen der Konstantklimatrocknung (Abbildung 31). Aufgrund der großen Phasenlänge werden die oberflächennahen Brettschichten stark heruntergetrocknet. Unterhalb Fasersättigung verlaufen die Transportvorgänge so langsam, dass nicht genügend Feuchte aus dem Brettinneren nachgeliefert werden kann. Die Entfeuchtungsgeschwindigkeit wird aufgrund der niedrigen Feuchte in den oberflächennahen Brettschichten sogar noch weiter verringert. Dadurch erhöht sich die Differenz zwischen Oberflächenfeuchte und Kernfeuchte.

Somit zeigt Versuch K3 als einziger Versuch auch noch unterhalb Fasersättigung eine Verbesserung der Feuchteverteilung im Gegensatz zur Konstantklimatrocknung.

### 6.7.3 Einfluss des Wechselklimas auf die Spannungen

Ein eindeutiger Effekt der Wechselklimatrocknung auf die Spannungsverteilung konnte bei den Kieferntrocknungen nicht beobachtet werden. Die Proben der Wechselklimatrocknung in der ersten Versuchsreihe waren nur geringfügig stärker verschalt als die Proben der Konstantklimatrocknung. In der zweiten Versuchsreihe war die Verschaltung der Konstantklimatrocknung stärker ausgeprägt. Eine gesicherte Aussage über einen Effekt der Wechselklimatrocknung auf die Spannungsverteilung im Holz kann somit zur Zeit noch nicht gemacht werden. Die Ergebnisse weisen zumindest nicht auf eine deutliche Verstärkung der Verschaltung hin.

Bei den Buchenholztrocknungen (60 mm) ergab sich bei den Wechselklimatrocknungen jedoch ein wesentlich geringerer Verschaltungsgrad als bei der Referenzrocknung.

### 6.7.4 Fazit

Durch die Modifikation einer Trocknerregelung ist es gelungen, das Trocknungsverhalten und die Feuchteverteilung im Holz positiv zu beeinflussen. Die Modifikation beschränkt sich ausschließlich auf die Regelung. Es müssen keine Veränderungen der Anlagentechnik vorgenommen werden. Erste Vorversuche an einem deutlich größer dimensionierten Trockner zeigten, dass dieser ebenfalls in der Lage ist, die Sollwertsprünge der Wechselklimatrocknung zu bewältigen.

Die bisher erzielten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass sich durch die Anwendung von Trocknungsplänen mit zyklischen Klimaschwankungen im hohen Holzfeuchtebereich deutliche Verkürzungen der Trocknungszeit ohne Qualitätseinbußen verwirklichen lassen. Hierdurch könnten

nach entsprechender Absicherung der Ergebnisse unter industriellen Bedingungen die Prozessführung der F/A-Trocknung entscheidend verbessert und die Trocknungszeit in erheblichem Umfang reduziert werden.

## 7 Ergebnisse der Trocknungen im halbindustriellen Maßstab

Die bisher beschriebenen Versuchsergebnisse resultieren aus Trocknungsversuchen in einem Labortrockner mit sehr geringem Fassungsvermögen und mit gezielt ausgesuchtem Probenmaterial. Im Rahmen der im weiteren beschriebenen Versuche sollte ermittelt werden, ob und wie sich die gewonnenen Erkenntnisse in einen größeren Maßstab übertragen lassen. Hierzu wurden eine Reihe von Versuchstrocknungen mit Fichtenschnittholz im halbindustriellen Maßstab durchgeführt. Die Programmsteuerung zur Realisierung der Wechselklimatrocknung wurde hierzu an einem Brunner-Hildebrand Trockner mit einem nutzbaren Stapelvolumen von  $1 \times 1 \times 2 \text{ m}^3$  installiert. Der F/A-Trockner weist alle Funktionselemente auf, die sich auch bei einem großen industriellen F/A-Trockner finden.

Im Vergleich zu dem im industriellen Einsatz üblichen Fassungsvermögen von 100-400  $\text{m}^3$  Schnittholz mit Stapeltiefen von 8 bis 10 m ist die hier verwendete Stapeltiefe von 1 m immer noch sehr gering. Gegenüber den zuvor beschriebenen reinen Labortrocknungen ergibt sich jedoch der Vorteil, dass die Probenanzahl (Anzahl Bretter in einer Trocknung) von 8-14 auf ca. 120 Bretter angehoben werden konnte. Dies bedeutet jedoch automatisch, dass das zu trocknende Material eine größere Streubreite hinsichtlich der Anfangsfeuchte und anderer trockenungsrelevanter Eigenschaften (Jahrringorientierung, Rohdichte, etc.) aufweist. Die erzielten Ergebnisse müssen deshalb immer unter statistischen Gesichtspunkten analysiert werden.

### 7.1 Versuchsmaterial (Fichte), Vorbereitung der Trocknungsversuche

Für die Trocknungsversuche im halbindustriellen Maßstab wurden ca. 15  $\text{m}^3$  Fichtenschnittholz aus frischem Einschnitt in einem lokal ansässigen Sägewerk beschafft. Das Rundholz stammte aus dem Lübecker Staatsforst. Eingeschnitten wurden Fichtenstämme mit einem Durchmesser von 25-35 cm.

Das Schnittholz mit einer Länge von 4,50 m wurde unbesäumt an der BFH angeliefert. Die Brettlänge im Schnittholztrockner ist auf 2 m begrenzt. Für einen Trocknungsversuch musste eine Zeit von ca. 1 Woche (Vorbereitung/Besäumen der Bretter, Trocknung, Auswertung) kalkuliert werden. Erst dann wurde mit der Vorbereitung der nächsten Trocknung begonnen. Während dieses Zeitraumes konnte eine Abtrocknung des unbesäumten Schnittholzes nicht gänzlich unterbunden werden.

Vor Versuchsbeginn wurden die 4,5 m langen unbesäumten Bretter auf 2 m Längen gekappt, die anschließend besäumt wurden. Vor und hinter jedem 2 m Stück wurden Querriegel zur Bestimmung der Anfangsfeuchte mittels Darmmethode entnommen. Das bedeutet, dass immer 2 der 3 Darriegel vom Hirnende stammten. Bedingt durch die verstärkt Austrocknung über die Brettenden ergab sich so tendenziell eine zu geringe Anfangsfeuchte. Wäre nur ein Querriegel zwischen den beiden 2 m Stücken entnommen worden, hätte sich tendenziell eine zu hohe Anfangsfeuchte ergeben.

Alle Bretter wurden nummeriert, um eine Zuordnung der mittels Darmmethode bestimmten Anfangsfeuchte zu ermöglichen. Für jedes Brett wurde vor der Beschickung des Trockners das Anfangsgewicht bestimmt. Als Summe aller Einzelgewichte ergab sich das Chargenanfangsgewicht.

Während der Trocknung wurde der Gewichtsverlust der gesamten Charge durch eine unter dem Trockner installierten Waage protokolliert. Zusätzlich wurden 8 Elektrodenpaare zur Ermittlung der Holzfeuchte nach dem Widerstandsmessprinzip in Splintholzbereiche eingeschlagen.

## 7.2 Trocknungsversuche im halbindustriellen Maßstab mit Fichtenholz

Mit dem Fichtenschnittholz wurden zwei Versuchsreihen gefahren. Bei Versuchsreihe 1 (Trocknung F1 -F3) wurde der Trocknungsverlauf anhand der Abnahme der elektrisch ermittelten Holzfeuchte gesteuert, wie dies in der Praxis allgemein üblich ist. Bei der Versuchsreihe 2 (F 4 - F6) wurde über die gesamte Trocknungsdauer mit konstanten Bedingungen getrocknet. Tabelle 16 zeigt eine Übersicht über die gewählten Trocknungsbedingungen. Die Gründe für diese Vorgehensweise werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

Holzfeuchtebereich	Temp.	F 1	F 2	F 3	Temp.	F 4	F 5	F 6
> 50	65	12	12 +/- 3	12 +/- 3	65	12	12 +/- 2	12 +/- 2
50 - 45	65	12	12 +/- 3	12 +/- 3	65	12	12 +/- 2	12 +/- 2
45 - 40	65	12	12 +/- 3	12 +/- 3	65	12	12 +/- 2	12 +/- 2
40 - 35	65	12	12 +/- 3	12 +/- 3	65	12	12 +/- 2	12 +/- 2
35 - 30	65	12	12 +/- 3	12 +/- 3	65	12	12 +/- 2	12 +/- 2
30 - 25	65	12	12 +/- 3	12 +/- 3	65	12	12 +/- 2	12 +/- 2
25 - 20	70	10	10	10	65	12	12 +/- 2	12 +/- 2
20 - 15	75	7	7	7	65	12	12 +/- 2	12 +/- 2
15 - 10	80	4,5	4,5	4,5	65	12	12 +/- 2	12 +/- 2
Frequenz [h]		-	2	4		-	2	4

**Tabelle 16:** Trocknungspläne für die Fichtentrocknungen im halbindustriellen Maßstab

Nach Abschluss der Trocknungsphase folgten bei allen Versuchstrocknungen die folgenden Schritte:

- 1) Abkühlung auf ca. 30°C
- 2) Entnahme der Ladung und Ermittlung der Brettgewichte
- 3) Entnahme von Darrriegeln und Mittenschnittproben in einem Abstand von 30 cm vom Brettende
- 4) visuelle Begutachtung der Bretter hinsichtlich Rissbildung und Deformationen
- 5) Verbringung der ca. 1,7 m langen Reststücke in die Trockenkammer zur Konditionierung
- 6) Aufwärmen auf 65°C und Konditionierung bei ugl=12% über 18 h
- 7) Abkühlen auf ca. 30°C
- 8) Entnahme der Charge
- 9) erneute Entnahme von Darrriegeln und Mittenschnittproben im Abstand von 30 cm vom Brettende

## 7.3 Ergebnisse der Fichtenversuchstrocknungen

### 7.3.1 Trocknungszeit

Wie im vorigen Kapitel bereits erwähnt wurden im Rahmen Trocknungsversuche im halbindustriellen Maßstab zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die Verläufe der Trocknungen F1 - F3 und F4 bis F6 sind in den nachstehenden Grafiken dokumentiert.

Wie aus **Abbildung 37**, **Abbildung 38** und **Abbildung 39** zu erkennen ist, wiesen die drei Trocknungschargen unterschiedliche Anfangsfeuchten auf. Bei den eingezeichneten Kurven mit der Bezeichnung "Holzfeuchte berechnet" handelt es sich um die mittels der eingebauten Waage ermittelten Holzfeuchteabnahme. Diese wurde nachträglich berechnet auf Basis der mittels Darmmethode bestimmten Endfeuchten und den Brettgewichten. Entsprechende Kurven auf der Basis der Anfangsfeuchten wurden nicht dargestellt, nachdem sich im Rahmen von Vorversuchen herausgestellt hatte, dass die mittels Darmmethode ermittelten Anfangsfeuchten nicht mit den tatsächlich vorhandenen mittleren Anfangsfeuchten der Bretter übereinstimmte.

Der Trocknungsablauf, d.h. die Entscheidung darüber wann das Trocknungsprogramm in die jeweils nächste Stufe des Trocknungsplan springt, hängt von der elektrisch ermittelten mittleren Holzfeuchte ab. Aus den Abbildungen ist außerdem zu erkennen, dass die elektrische Holzfeuchtemessung (dargestellt sind die ungedämpften Mittelwerte der angeschlossenen Messstellen) großen Schwankungen unterliegt und im Bereich oberhalb Fasersättigung recht unzuverlässig ist. Aus den Trocknungsplänen für die Fichtenversuchstrocknungen ist zu ersehen, dass die Trocknungsbedingungen bei den Versuchen F1 - F3 erst beim Erreichen einer Holzfeuchte von 25% verändert werden. Der Zeitraum, während dessen das Versuchsmaterial einem  $u_{gl}$  von 12% bzw. Wechselklimabedingungen mit einem mittleren  $u_{gl}$  von 12% ausgesetzt war, hängt einerseits von der Anfangsfeuchte, und damit vom zu durchschreitenden Feuchteintervall, andererseits aber auch von den gewählten Trocknungsbedingungen (konstantes  $u_{gl}$  oder Wechselklima) ab. Um den Einfluss der Wechselklimabedingungen im Vergleich zum Konstantklima zu ermitteln, können nur vergleichbare Feuchteintervalle zur Interpretation herangezogen werden. Diese sind in der Abbildung 40 für die Trocknungen F1 -3 dargestellt.

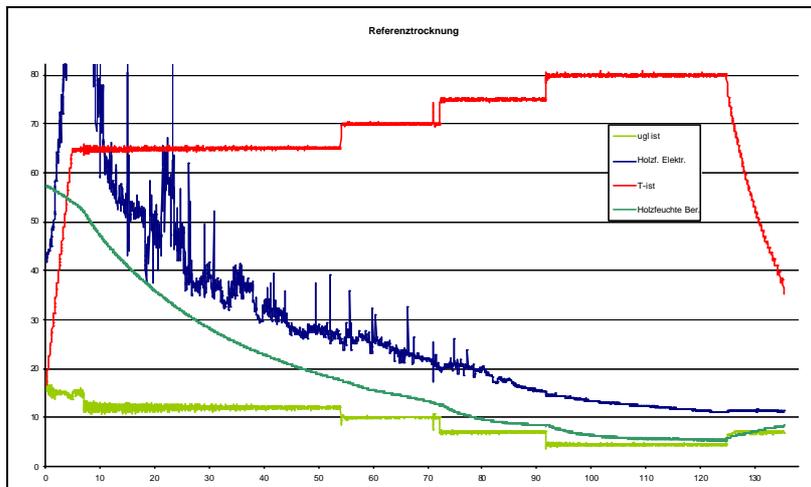


Abbildung 37: Verlauf Trocknung F1 (Referenz)

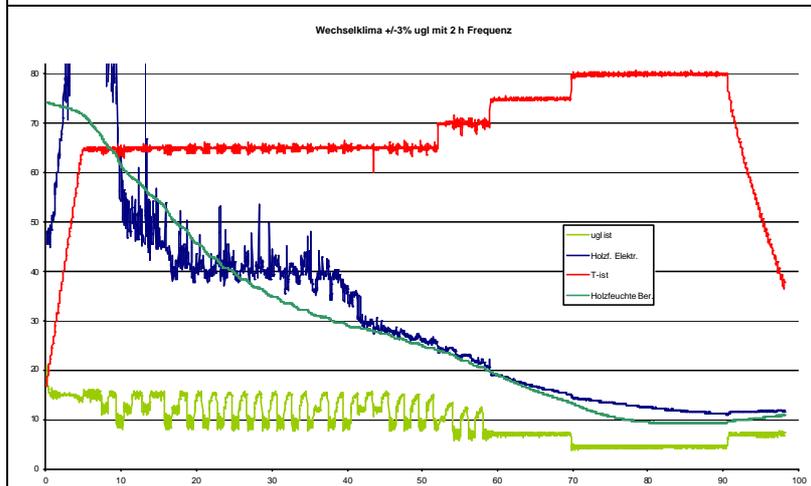


Abbildung 38: Verlauf Trocknung F2 ( $\pm 2\% u_{gl} / 2 h$ )

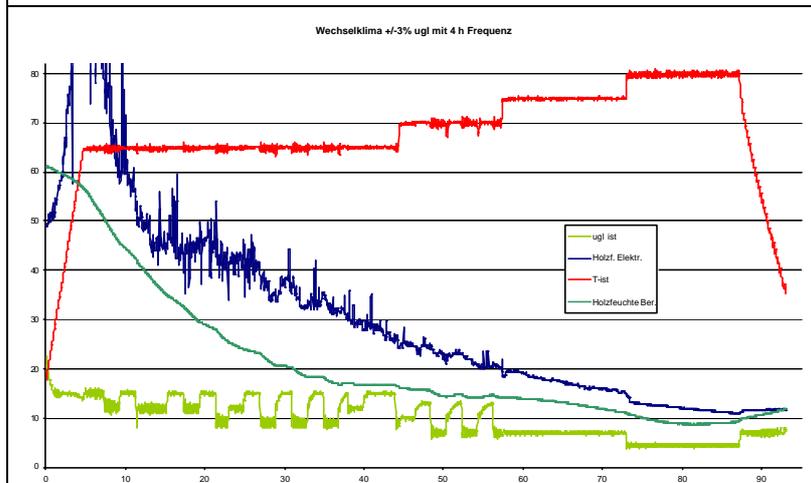
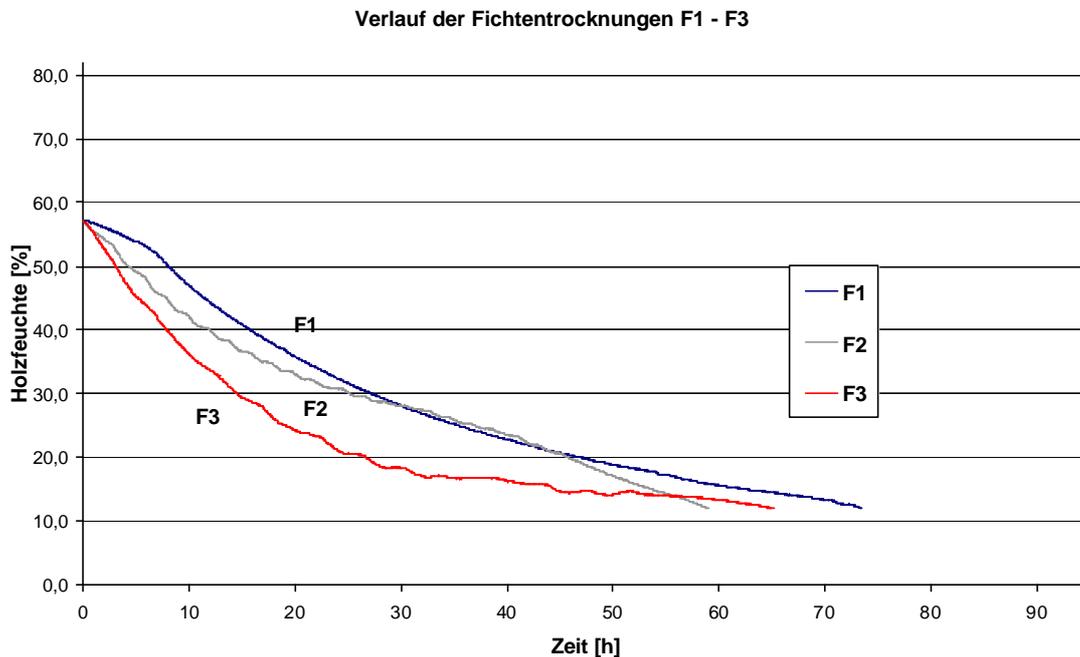


Abbildung 39: Verlauf Trocknung F3 ( $\pm 2\% u_{gl} / 4 h$ )



**Abbildung 40:** Zeitbedarf für Durchschreitung des Feuchteintervalls von 58% bis 12% für die Fichtentrocknungen F1 - F3

Es ist ersichtlich, dass die beiden Wechselklimatrocknungen F2 und F3 ca. 10-15% schneller sind als die Konstantklimatrocknung F1. Außerdem ist zu ersehen, dass die Trocknung F3 mit den langen Wechselklimaphasen anfänglich schneller verläuft als Trocknung F2 mit den kurzen Wechselklimaphase. Allerdings verliert sich der Zeitvorteil gegen Ende der Trocknung wieder. Ob dies immer so ist, oder ob dies durch die unterschiedlichen Anfangsfeuchten bedingt war, kann nicht beantwortet werden.

Um die Unterschiede zu bestätigen bzw. um die Problematik der unterschiedlicher Anfangsfeuchten und damit der unterschiedlich langen Verweildauer in den verschiedenen Trocknungsstufen auszuschließen, wurde eine zusätzliche Versuchsreihe mit nur einer über die gesamte Trocknung andauernden Trocknungsbedingung durchgeführt. Als Referenz diente eine Konstantklimatrocknung (F4) bei 65°C und einem  $u_{gl}$  von 12%. Als Wechselklimabedingungen wurden 12%  $\pm$  2% und einer Frequenz von 2 Stunden (F5) und 4 Stunden (F6) gewählt.

**Abbildung 41**, **Abbildung 42** und **Abbildung 43** zeigen die Trocknungsverläufe über die gesamte Verweilzeit in der Trockenkammer. Aus **Abbildung 43** ist zu ersehen, dass der aus den Waagen-signal ermittelte Trocknungsverlauf nicht ausgewertet werden kann. Bedingt durch einen technischen Defekt im Messverstärker kam es zu einer zeitlich veränderlichen Off-Set-Verschiebungen des Tarawertes der Waage. Für den Vergleich der Trocknungsverläufe musste deshalb auf den Mittelwert der elektrischen Holzfeuchtemessung zurückgegriffen werden.

Aus **Abbildung 44** ist zu ersehen, dass die beiden Trocknung mit Wechselklimabedingungen im hohen Holzfeuchtebereich schneller verlaufen als die Konstantklimatrocknung. Unterhalb von Fasersättigung ergibt sich in etwa die gleiche Trocknungsgeschwindigkeit, was allerdings auch nicht verwunderlich ist, da die Trocknungsbedingungen unterhalb Fasersättigung im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Trocknungen sehr mild sind. Insgesamt ergibt sich für die Wechsel-

klimatrocknungen dennoch ein Zeitvorteil bis zum Erreichen einer Holzfeuchte von 15% in der gleichen Größenordnung wie zuvor beschrieben.

In **Abbildung 45** wird ein Gesamtüberblick über den Zeitbedarf für die Durchschreitung unterschiedlicher Feuchteintervalle über alle Fichtentrocknungsversuche gegeben. Bei den Trocknungen F1 bis F3 weisen die Wechselklimatrocknungen F2 und F3 einen Zeitvorteil von ca. 10-15% im hohen Feuchtebereich (58-30%) gegenüber der Konstantklimatrocknung (F1) auf. Bei den Wechselklimatrocknungen F5 und F6 zeigt sich dieser Zeitvorteil gegenüber F 4 nicht mehr so deutlich. Allerdings wurde hier eine Amplitude von  $\pm 2\%$   $u_{gl}$  verwendet, während in der ersten Versuchsreihe eine Amplitude von  $\pm 3\%$   $u_{gl}$  zur Anwendung kam.

Auch unterhalb von Fasersättigung ergeben sich für die Wechselklimatrocknungen F2 und F3 erhebliche Zeitvorteile (10-15%) gegenüber der Referenzrocknung F1. Addiert man die beiden Effekte, dann erscheinen Zeitvorteile von 20-25% bei Anwendung der Wechselklimatrocknung im Bereich des Möglichen.

Die mit einer Endtemperatur von 80°C im Vergleich zu der in Deutschland gängigen Praxis relativ hoch angesetzte Trocknungstemperatur hat bei den Versuchstrocknungen F1 bis F3 vergleichsweise kurze Trocknungszeiten bewirkt. Der positive Effekt der Wechselklimabedingungen hätte sich bei niedrigerem Temperaturniveau aller Wahrscheinlichkeit nach noch stärker ausgewirkt.

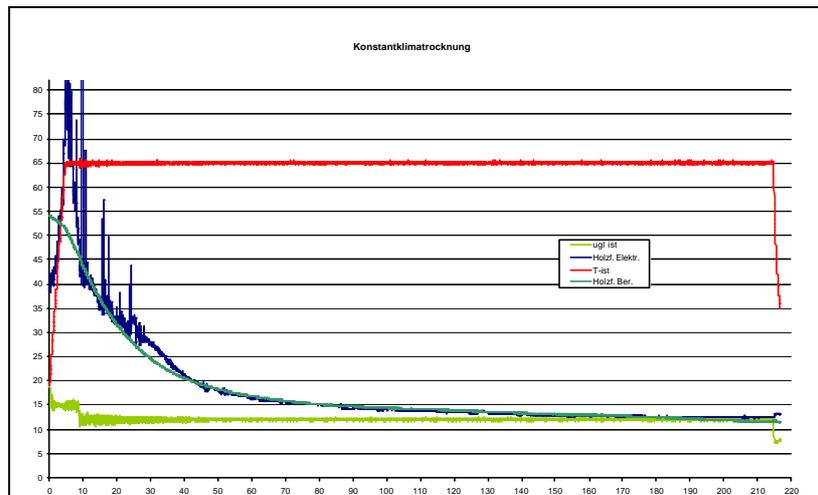


Abbildung 41: Verlauf Trocknung F4 (Referenz)

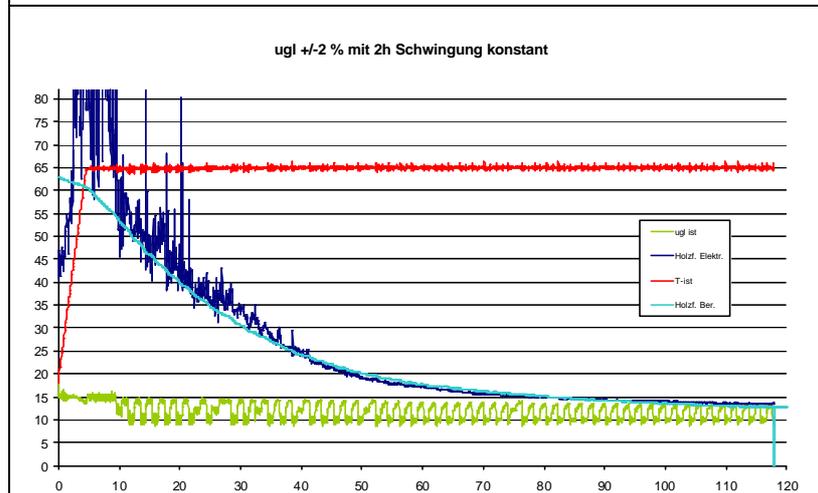


Abbildung 42: Verlauf Trocknung F5 ( $\pm 2\% u_{gl} / 2 \text{ h}$ )

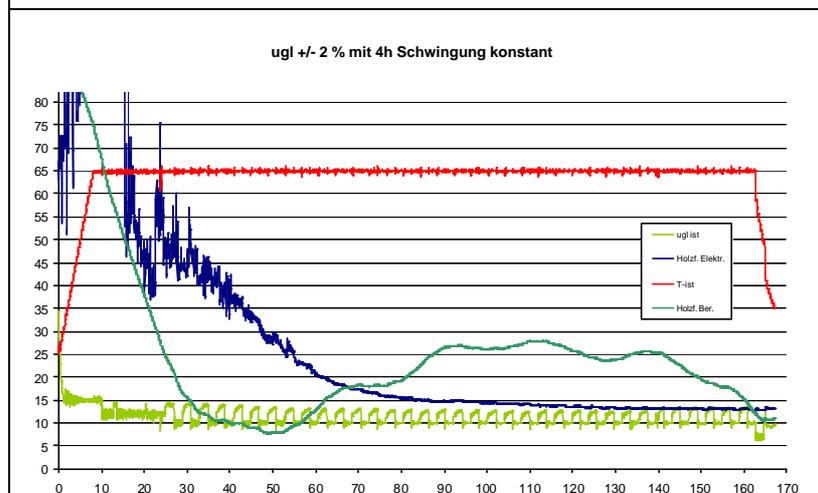


Abbildung 43: Verlauf Trocknung F6 ( $\pm 2\% u_{gl} / 4 \text{ h}$ )

Verlauf der Fichtentrocknungen F4 - F6

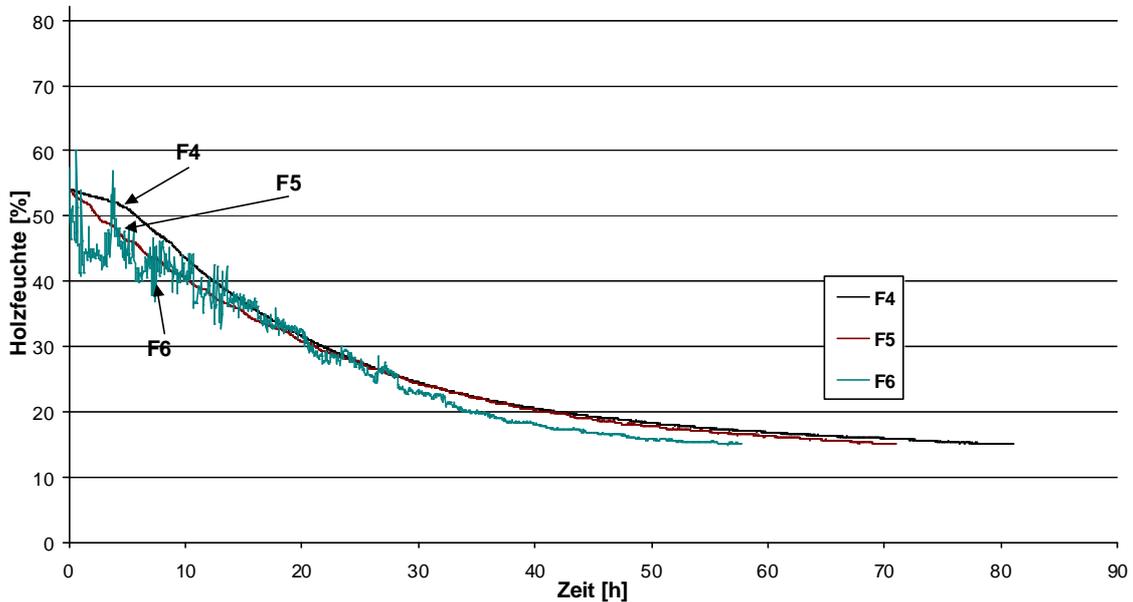


Abbildung 44: Zeitbedarf für Durchschreitung des Feuchteintervalls von 54% bis 15% für die Fichtentrocknungen F4 - F6

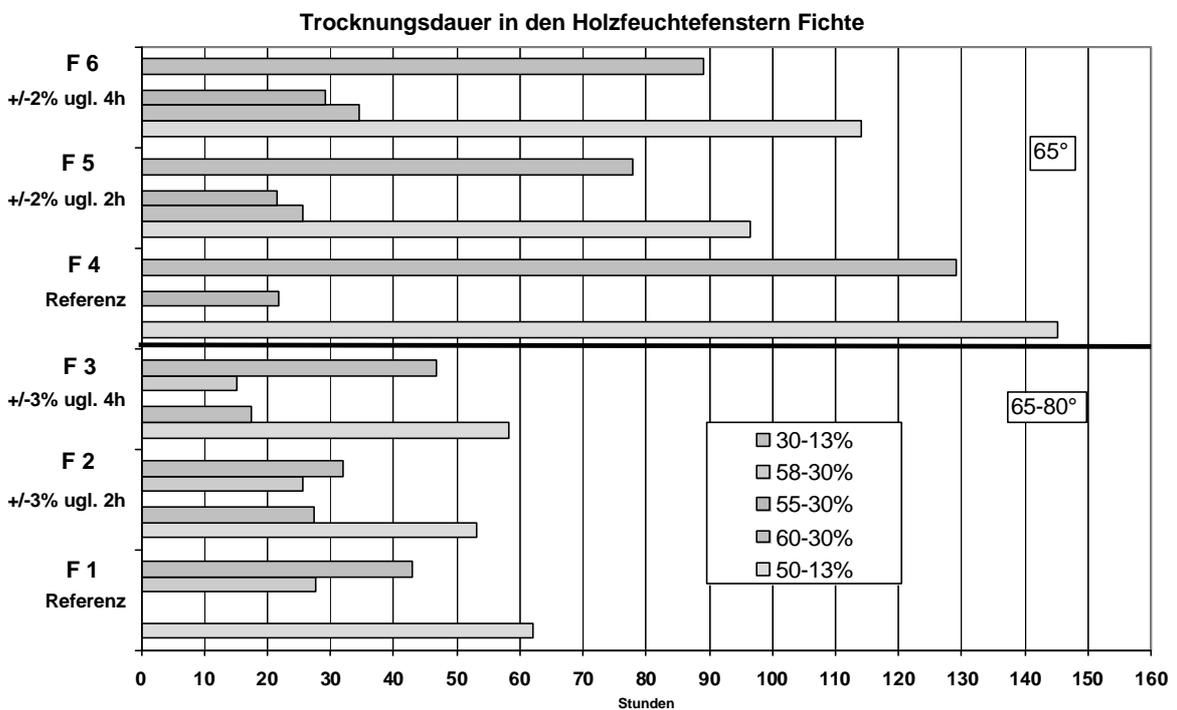


Abbildung 45: Gesamtübersicht über den Zeitbedarf für Durchschreitung von Feuchteintervallen

Die Erfahrungen mit den Versuchstrocknungen im halbindustriellen Maßstab haben gezeigt, dass die Bereitstellung wirklich vergleichbarer Trocknungschargen erhebliche Schwierigkeiten bereitet. Die ausschließliche Betrachtung der Gesamttrocknungszeit kann bei unterschiedlichen Anfangsfeuchten die Interpretation bzw. das Erkennen verfahrensbedingter Unterschiede unmöglich machen.

### 7.3.2 Trocknungsqualität

Die Trocknungszeit kann und darf nicht das einzige Kriterium sein, anhand dessen entschieden wird, ob eine verfahrenstechnische Veränderung oder eine Anpassung des Trocknungsplans positive oder negative Auswirkungen hat. Die Trocknungsqualität, im Rahmen dieser Untersuchung ausgedrückt durch den Verschalungsgrad, sollte immer zusätzlich untersucht werden.

In **Tabelle 17** sind die bei den zwei Versuchsserien mit Fichtenschnittholz ermittelten Verschalungsgrade, sowie die Endfeuchten und deren Streuung innerhalb der Trocknungscharge aufgelistet.

		F1	F2	F3	F4	F5	F6
nach Trocknung	Holzfeuchte	8,29	10,84	11,84	11,54	11,92	11,05
	std	0,80	1,18	1,31	0,68	0,52	0,62
nach Konditionierung	Holzfeuchte	8,97	10,81	11,71	11,40	12,72	10,93
	std	0,72	0,89	0,92	0,51	0,43	0,36
nach Trocknung	Verschalung	1,2	1,9	1,8	0,7	0,5	0,6
	std	0,6	0,9	1,1	1,2	0,4	0,5
nach Konditionierung	Verschalung	0,7	1,0	1,7	0,5	0,9	1,0
	std	0,4	0,7	1,0	0,8	0,6	0,6

**Tabelle 17:** Übersicht über Endfeuchte, Feuchtestreuung und Verschalung bei den halbindustriellen Fichtenholz-trocknungen

#### Streuung der Endfeuchte

Die Referenz-trocknung F1 kann mit einer Endfeuchte von 8% als über-trocknet bezeichnet werden. Die beiden Wechselklimatrocknungen F2 und F3 kommen der Zielfeuchte von 12% recht nahe. Die niedrige Standardabweichung 0,8 bereits vor der Konditionierung bei Trocknung F1 ist bedingt durch die niedrige Endfeuchte. Je niedriger die Endfeuchte, desto niedriger fällt normalerweise die Standardabweichung aus. Aber auch die bei den Wechselklimatrocknungen erzielten Standardabweichungen von 1,2 (F2) und 1,3 (F3) vor der Konditionierung können als durchaus akzeptabel angesehen werden. Die Werte liegen unterhalb der Grenzwerte für Standard-trocknungsqualität nach dem neuen CEN Normenentwurf für die Trocknungsqualität. Nach der Konditionierung verringert sich die Standardabweichung der Holzfeuchte erwartungsgemäß.

#### Verschalung

Die Verschalung als wichtiges Qualitätskriterium muss separat betrachtet werden. Bei den Fichten-trocknungen wurden ähnliche Tendenzen wie bei den Labortrocknungen mit Kiefern-splintholz festgestellt. Die Referenz-trocknung F1 wies mit einem mittleren Verschalungsgrad von 1,2 mm Spaltöffnung eine geringere Verschalung auf als die Wechselklimatrocknung F2 (1,9 mm) und F3 (1,8 mm). In allen drei Trocknung konnte die Verschalung durch die anschließende

Konditionierphase reduziert werden. Bei Trocknung F3 fiel die Abminderung allerdings sehr gering aus. Gründe hierfür können nicht genannt werden.

Sowohl die Wechselklimatrocknungen als auch die Referenzrocknung liegen hinsichtlich des Verschalungsgrades vor und nach der Konditionierung durchaus in einem Bereich, der von der industriellen Praxis ohne Probleme akzeptiert werden würde.

Bei der zweiten Versuchsserie sind insgesamt wesentlich geringere Verschalungsgrade und Feuchteunterschiede innerhalb und zwischen den Trocknungen festgestellt worden. Dies war jedoch zu erwarten, da hier zum einen recht mild (vor allem gegen Ende der Trocknung) und mit ständigen Wechselklimabedingungen bis zum Trocknungsende gearbeitet wurde. Dies hatte zur Folge, dass sich die Trocknungsspannungen bereits während der Trocknung abbauen konnten. In der anschließenden Konditionierphase war nur bei der Referenzrocknung F4 ein geringer Verbesserungseffekt zu erzielen. Bei den Wechselklimatrocknungen (F5 und F6) stieg der Verschalungsgrad von extrem niedrigem Ausgangsniveau wieder leicht an. Hieraus sollten aber keine falschen Schlüsse gezogen werden. Die für die zweite Versuchsserie gewählten Trocknungsbedingungen dienten einzig und allein dem Nachweis des Wechselklimaeffektes auf die Trocknungszeit. Bedingungen dieser Art würden unter Praxisbedingungen niemals zur Anwendung kommen.

## 8 Wertung / Chancen für eine Umsetzung in der Praxis

Anhand der Ergebnisse einer Vielzahl von Trocknungsversuchen im Labor- und halb-industriellen Maßstab konnte gezeigt werden, dass die Anwendung von Trocknungsplänen mit Wechselklimabedingungen positive Effekte im Hinblick auf eine Verkürzung der Trocknungszeit und/oder eine Verbesserung der Trocknungsqualität erreicht werden können. Bei ansonsten gleichen Bedingungen kann davon ausgegangen werden, dass mit Wechselklimatrocknungsplänen die Trocknungszeit um mindestens 10% verkürzt werden kann ohne dass sich die Trocknungsqualität merklich verschlechtert. Bei gleicher Trocknungszeit ist mit einer Verbesserung der Trocknungsqualität zu rechnen.

Im Rahmen der Versuche konnte keine umfassende Optimierung der Wechselklimabedingungen für bestimmte Holzarten und Brettstärken durchgeführt werden. Dies wird verständlich, wenn man sich die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten von Wechselklimatrocknungsplänen vor Augen führt. Phasenlänge und Amplitude wurden beispielhaft untersucht, wobei sich die Anwendung der Wechselklimabedingungen auf den Holzfeuchtebereich bis 20% Holzfeuchte beschränkte. Es liegt durchaus im Bereich des Möglichen, dass auch unterhalb von 20% Holzfeuchte die Wechselklimabedingungen noch positive Effekte zeigen.

Die ursprünglich beabsichtigte Durchführung der Wechselklimatrocknung im industriellen Maßstab an realen Großraumtrockenkammern wurde nicht in Angriff genommen. Hierfür gab es eine Reihe von Gründen, die im folgenden kurz erläutert werden sollen.

- 1) Das Mess-, Steuer- und Regelprogramm für die Wechselklimatrocknung wurde von uns für Labortrocknungsanlagen konzipiert und an die spezifischen Gegebenheiten (Stellglieder, Regelverhalten, etc.) angepasst. Dies erforderte viel Zeit und Entwicklungsaufwand.
- 2) Die Trocknungsversuche erforderten mehr Zeit als ursprünglich angenommen. Viele Versuche mussten wiederholt bzw. modifiziert werden, da einerseits technische Probleme zu lösen waren, andererseits aber auch die Bereitstellung von vergleichbaren Trocknungschargen erhebliche Probleme aufwarf.
- 3) Für eine Installation einer Wechselklimasteuerung an einem Großraumtrockner hätte die vorhandene Steuerung durch unsere Prototyp-Steuerung ersetzt werden müssen. Ein Eingriff in bestehende Steuerprogramme ist nicht möglich, da diese von den Hersteller geschützt und damit nicht zugänglich sind.
- 4) Obwohl sich im Laufe des Projektes ein Industriepartner fand, der prinzipiell hierzu bereit gewesen wäre, wurde auf eine Realisierung nach ausführlicher Diskussion der Risiken und Chancen verzichtet. Die Risiken bestehen zum einen in der erforderlichen Zeit für die Anpassung und den Test des Systems. Hierfür hätte der industrielle Trockner für längere Zeit stillgelegt werden müssen. Um den Effekt der Wechselklimatrocknung bei Großraumtrocknern nachzuweisen, hätte ein erheblicher Teil der Charge einer zerstörenden Prüfung unterzogen werden müssen, was dem Industriepartner nicht zuzumuten war. Andererseits wäre, bedingt durch das Fehlen von gut dokumentierten Referenz Trocknungen eine Herausarbeitung von Unterschieden zwischen konventionellen und Wechselklimatrocknungsplänen praktisch unmöglich gewesen. Der Industriepartner trocknet eine breite Palette von Holzarten und Stärken,

so dass eine Wiederholung von Trocknungen mit vergleichbarem Material sehr schwierig, wenn nicht sogar unmöglich, gewesen wäre.

- 5) Nur um zu zeigen, dass die von uns konzipierte Wechselklimatrocknung an einem Großraumtrockner installiert werden kann, ohne dass jedoch in der zur Verfügung stehenden Zeit Unterschiede herausgearbeitet werden können, erschien der erhebliche Aufwand nicht gerechtfertigt.

Um abschätzen zu können, welche Chancen für eine Umsetzung der Wechselklimatrocknung in der Praxis bestehen, muss man sich vorab vergegenwärtigen, welche Trocknungsbedingungen in einem Großraumtrockner im Vergleich zu einer kleinen Trockenkammer vorliegen. Unter der Annahme gleicher Trocknungspläne ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Unterschiede.

	<b>Kleine Trockner</b>	<b>Großraumtrockner</b>
<b>a</b>	Schnelles Reaktionsverhalten	Langsames Reaktionsverhalten
<b>b</b>	On/Off-Stellglieder, angesteuert durch Regler mit simuliertem PID-Zeitverhalten	Proportionale Stellglieder, gesteuert von echten PID-Reglern
<b>c</b>	Kontinuierliche Energieversorgung (elektrisch)	Energieversorgung abhängig von Belastung des Kesselhauses
<b>d</b>	Geringe Blastiefe (Stapelbreite)	Große Blastiefe (8-10 m)
<b>e</b>	Praktisch konstante Trocknungsbedingungen über die gesamte Stapelbreite)	Stark veränderliche Trocknungsbedingungen über die Stapelbreite in Abhängigkeit vom Feuchteangebot aus dem zu trocknenden Schnittholz
<b>f</b>	Optimale Ausstapelung	Meist suboptimale Ausstapelung bedingt durch unterschiedliche Paketlängen
<b>g</b>	Gleichmäßige Strömungsbedingungen	wahrscheinlich ungleichmäßige Strömungsbedingungen über die Stapelhöhe und bedingt durch suboptimale Ausstapelung

**Tabelle 18:** Unterschiede zwischen kleinen und großen Trocknern im Hinblick auf die Anwendung von Wechselklimabedingungen

Die aufgeführten Unterschiede müssen als gegeben hingenommen werden. Teilweise kann durch eine Anpassung der Software (z.B. Punkte a und b) gezielt reagiert werden.

Besondere Beachtung verdient Punkt e. In jedem Großraumtrockner mit Reversierbetrieb der Lüfter (was die Regel ist) liegen im Prinzip Wechselklimatrocknungsbedingungen auch bei Verwendung von konventionellen Trocknungsplänen bereit vor. Die zirkulierende Umluft wird entsprechend den Sollwertvorgaben aus dem Trocknungsplan so aufbereitet, dass die Trocknungsbedingungen auf der Stapelzuluftseite den Sollwerten entsprechen. Während die aufbereitete Luft entlang der Blastiefe durch die hintereinander liegenden Stapel streicht, nimmt sie Feuchtigkeit aus dem Holz auf, wodurch sich das  $u_{gl}$  erhöht und die Temperatur erniedrigt. Auf der Zuluftseite liegen immer schärfere Trocknungsbedingungen wie auf der Abluftseite vor. Bei der Umkehr der Luftrichtung wird die Zuluftseite zur Abluftseite, was bedeutet, dass nun die schärferen Bedingungen auf der anderen Trocknerseite vorliegen. Dies entspricht im Prinzip den von uns gewählten Bedingungen bei der Wechselklimatrocknung, bei der sich Phasen mit scharfen Trocknungsbedingungen mit Phasen mit

milden Bedingungen abwechseln. Allerdings geschieht dies bei der Wechselklimatrocknung gezielt, im Großraumtrockner jedoch in Abhängigkeit vom Feuchteangebot aus dem Holz und damit unregelmäßig und zeitlich veränderlich.

Ohne genaue Kenntnis der Änderung der Trocknungsbedingungen über die Trocknertiefe eines Großraumtrockners kann nicht abgeschätzt werden, ob und wie weit die von uns im Labor erprobten Wechselklimabedingungen in einem Großraumtrockner bereits vorliegen. Fest steht bisher nur, dass das Trocknungsgut in Großraumtrocknern wechselnden Klimabedingungen ausgesetzt ist.

Im Rahmen eines Folgeprojektes sollen die Änderungen der Trocknungsbedingungen bei der Durchströmung von Stapeln in Großraumtrocknern analysiert werden. Bei genauer Kenntnis dieser Änderungen können dann durch geschickte Anpassung des Trocknungsplanes und der Reversierzeiten Trocknungsbedingungen in Großraumtrocknern geschaffen werden, die den im Rahmen dieses Projektes erprobten Bedingungen der Wechselklimatrocknung weitgehend entsprechen.

Wie oben bereits erwähnt, wird in keiner Weise der Anspruch erhoben, dass die gewählten Wechselklimabedingungen im Hinblick auf Trocknungszeit und Trocknungsqualität optimal sind. Im Rahmen einer industriellen Umsetzung und Erprobung sollte ausgehend vom Ist-Zustand und den geforderten Trocknungsqualitäten eine schrittweise Anpassung vorgenommen werden. Hierdurch wird das Risiko erheblich reduziert. Allerdings setzt diese Vorgehensweise voraus, dass das Trocknungsergebnis hinsichtlich Trocknungszeit und -qualität kontinuierlich und intensiv überprüft wird, was einen erheblichen Aufwand an Personal und Zeit mit sich bringen wird.

Zur Beschleunigung des Optimierungsprozesses und zur weiteren Verminderung des Risikos könnten Simulationsrechnungen durchgeführt werden. Hierfür ist erforderlich, dass die Ergebnisse der Simulationsrechnungen anhand von realen Ergebnissen überprüft werden.

Das Potential für Trocknungszeitverkürzungen und gezielte Qualitätsverbesserungen erscheint ausreichend groß für eine weitere intensive Beschäftigung mit dem Thema. Die erforderlichen Schritte wurden bereits eingeleitet. Allerdings ist nicht damit zu rechnen, dass sehr kurzfristig Erfolge auf breiter Basis erzielt werden können, da einer Anpassung der Trocknungsbedingung in realen Trocknern immer eine Analyse des Ist-Zustandes vorausgehen muss und der Erfolg der Änderungen immer im Hinblick auf die geforderte Trocknungsqualität überprüft werden muss.

Man sollte sich jedoch darüber im klaren sein, dass im Rahmen des geplanten Folgeprojektes zwar die Methodik zur Optimierung der Trocknung unter Verwendung der Wechselklimabedingungen etabliert werden kann, nicht jedoch eine allgemein anwendbare Optimierung durchgeführt werden kann. Die Optimierung selbst wird immer durch den jeweiligen Anwender unter Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten erfolgen müssen.

## 9 Zusammenfassung

Die technische Schnittholzrocknung ist eine wichtige Voraussetzung für die Weiterverarbeitung von Schnittholz. Die Verringerung der langen Trocknungszeiten sowie die steigenden Ansprüche an die Trocknungsqualität stellen für die mittelständische Holzbe- und verarbeitende Industrie eine große Herausforderung dar.

Ziele des Projektes waren: a) die Entwicklung einer Regelung zur Realisierung alternierender Klimabedingungen für F/A-Trocknungen, b) Durchführung von Versuchen zur Ermittlung der Auswirkung des Wechselklimas auf Trocknungsdauer, Feuchteverteilung und Trocknungsspannungen im Labormaßstab und halbindustriellen Maßstab. Diese Ziele wurden im Zuge der bisherigen Arbeiten erreicht. Dabei wurde die Regelung einer vorhandenen F/A-Trocknungsanlage für Versuche im Labor- und Pilotmaßstab auf die Erfordernisse der Trocknung im Wechselklima umgerüstet. Hierzu wurde ein modulares Mess-, Steuer- und Regelungssystem sowie entsprechende Sensoren installiert und eine Softwareregulierung programmiert.

Die entwickelte Trocknungsanlage setzt sich aus mehreren Elementen zusammen. Auf der ersten Ebene befindet sich der Computer, auf dem die Software Testpoint<sup>TM</sup> arbeitet. In der nächsten Ebene befinden sich die Mess- und Schaltelemente, die über eine Schnittstelle mit dem Computer verbunden sind. In der untersten Ebene befindet sich der Trocknungsapparat. Im Trockner wird die relative Luftfeuchte, die Temperatur sowie die Luftgeschwindigkeit geregelt. Die Benutzeroberfläche der Trocknerregelung besteht aus einer Hauptoberfläche und weiterer von hier aus aufzurufenden Benutzeroberflächen. Das System erlaubt die Vorgabe von Trocknungsplänen mit frei programmierbaren (Amplitude, Phasenlänge) Klimaschwingungen (Temperatur und  $u_{gl}$ ).

Es wurden Trocknungsversuche zur Kalibrierung und zur Optimierung des Regelungsverhaltens sowie zur Feststellung der Einflüsse des Wechselklimas auf das Trocknungsverhalten durchgeführt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse mit Kiefern-, Buchen und Fichtenschnittholz ergab, dass die entwickelte Regelung die Sollwertvorgaben der Konstantklimatrocknung und die der Wechselklimatrocknung sehr präzise erfüllt.

Des Weiteren konnte die Trocknungsdauer mit Wechselklimaphasen im Mittel um 10 % – 20 % gegenüber der Konstantklimatrocknung verkürzt werden. Hinsichtlich der erzielten Trocknungsqualitäten ergab sich ein nicht ganz so einheitliches Bild. Während bei den Nadelschnittholzrocknungen (30 mm Kiefer und Fichte) die Trocknungsqualität bei den Wechselklimabedingungen gegenüber den Referenzrocknungen mit konventionellem Trocknungsplan in etwa gleich bleibt bzw. sich geringfügig verschlechterte, konnte bei den Trocknungen mit 60 mm starken Buchenbohlen eine Erhöhung der Trocknungsqualität festgestellt werden.

Ein weiterer positiver Effekt konnte bei der Verschärfung der Trocknungsbedingungen ab Erreichen von 20 % Holzfeuchte im Anschluss an die Wechselklimaphase festgestellt werden. Bei allen Wechselklimatrocknungen erhöhte sich die Entfeuchtungsgeschwindigkeit im Bereich < 20 % Holzfeuchte.

Bei der Betrachtung der Feuchteverteilung über den Brettquerschnitt war bei den Versuchen mit Kiefernholz eine eindeutige Verbesserung durch die Wechselklimatrocknung gegenüber der Konstantklimatrocknung festzustellen. Die Differenz der Holzfeuchte zwischen Kernelektrode und

Oberflächenelektrode lag in allen Versuchen mit Wechselklimatrocknung unter der Differenz mit Konstantklimatrocknung.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es durch die Modifikation einer Trocknerregelung gelungen ist, im Labor- und halbindustriellen Maßstab das Trocknungsverhalten von Nadel- und Laubschnittholz und die Feuchteverteilung im Holz positiv zu beeinflussen. Die Modifikation beschränkt sich dabei ausschließlich auf die Regelung; es müssen keine Veränderung der Anlagentechnik vorgenommen werden.

Die bisher erzielten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass sich durch die Anwendung von Trocknungsplänen mit zyklischen Klimaschwankungen im hohen Holzfeuchtebereich deutliche Verkürzungen der Trocknungszeit ohne Qualitätseinbußen verwirklichen lassen. Hierdurch könnte nach entsprechender Absicherung der Ergebnisse unter industriellen Bedingungen die Prozessführung der F/A-Trocknung entscheidend verbessert und die Trocknungszeit in deutlichem Umfang reduziert werden. Entsprechende Vorschläge im Hinblick auf die Strategie zur Umsetzung bzw. Anwendung der Wechselklimatrocknung in der Praxis werden unterbreitet.

## 10 Literatur

- BAEHR, H. D. 1989: *Thermodynamik*. 7. Auflage. Springer-Verlag
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. 1938: Adsorption of gases in multimolecular layers. *Chem. Soc.* 60, S. 309-319
- BRUNNER, R. 1997a: Die Tage der konventionellen Schnittholztrocknung sind gezählt - Dampf statt Luft (1) . *Holz-Zentralblatt* 1997, Nr. 52/53 , S. 817, 828, 830
- BRUNNER, R. 1997b: Die Tage der konventionellen Schnittholztrocknung sind gezählt - Dampf statt Luft (2) . *Holz-Zentralblatt* 1997, Nr. 55/56 , S. 869, 872
- CEN (2000): prENV 175-091 Schnittholz - Verfahren zur Ermittlung der Verschalung (Stand 8/2000).
- CLOUTEIR, A.; FORTIN, Y. 1993: A model of moisture movement in wood, based on water potential and the determination of the effective water conductivity. *Wood Sci. Technol.* 27. S. 95-114
- DINWOODIE, J.; HIGGINS, J.; PAXTON, B.; ROBSON, D. 1990: Kriechforschung an Spanplatten. 15 Jahre Forschung am Building Research Establishment in England. *Holz Roh- Werkst.* 48, Nr. 1, S. 5-10
- DREINER, K: 1992: Beitrag zur Verbesserung der Prozeßführung während der Schnittholztrocknung durch ein weiterentwickeltes Steuerungskonzept und adaptive Klimaregler. *Dissertation Universität Hamburg*
- DREINER, K.; WELLING, J. 1992: Selftuning controllers for the kiln drying process. *Proceedings 3 IUFRO-Trocknungskonferenz, Wien*
- EDG 1994: Richtlinie "Trocknungsqualität". *EDG, Paris, Hamburg*
- GERHARDS, C. C. 1980: Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber* 14, Nr. 1, S.4-36
- HAILWOOD, A. J.; HORROBIN, S. 1948: Absorption of water by polymers: Analysis in terms of a simple model. *Trans. Faraday Soc.* 42, S. 84-102
- HANHIJÄRVI, A. 1995: Modelling of creep deformations mechanisms in wood. *Dissertation Helsinki University of Technology, Espoo, Finnland*, Nr. VTT Publication No. 231
- JOYET, P.; LAGIERE, P.; GUITARD, D. 1992: Creep behaviour and varying moisture content conditions. *Proceedings 3 IUFRO-Trocknungskonferenz, Wien*
- KNEULE, F. 1974: *Das Trocknen*. 3. Auflage. Verlag Sauerländer Aarau und Frankfurt am Main

- KOLB, H.; GOTH, H.; EPPLE, A. 1984: Untersuchungen zum Einfluss von Dauerbelastung, Temperatur- und Klimawechsellagerung auf die Querszugfestigkeit von Fichtenholz. *Forschungsbericht - IRB Stuttgart*, S. 51 p.
- KOLLMANN, F. 1951: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer-Verlag
- KRISCHER, O. 1978: *Trocknungstechnik – Die Wirtschaftlichen Grundlagen*. Band 1. Springer-Verlag
- MARTENSSON, A. 1992: Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations. *Report TVBK-006, Lund Institute of Technology, Department of Structural Engineering*
- MILTZER, K.-E.; WELLING, J. 1993: Prozeßüberwachung und Qualitätskontrolle bei der technischen Schnittholz Trocknung. *AIF-Forschungsbericht 172-D*
- MOHAGER, S.; TORATTI, T. 1993: Long term bending creep of wood in cyclic relative humidity. *Wood Sci. Technol.* 27, S. 49-59
- MOREN, T.; SEHLSTEDT-PERSSON, M. 1992: Creep deformations of the surface layer of timber boards during air circulation drying. *Proceedings 3 IUFRO-Trocknungskonferenz, Wien*
- NIEMZ, P.; HÄNSEL, A. 1988: Untersuchungen zur Ermittlung wesentlicher Einflußfaktoren auf die Schallemission von Vollholz und Holzwerkstoffen. *Holz Roh- Werkst.* 29, Nr. 2, S. 79-81
- PIZZI, A.; EATON, N.A.; BARISKA, M. 1987: Theoretical water sorption energies by conformational analysis Part 1: Crystalline Cellulose I. *Wood Sci. Technol.* 21, S. 235-248
- PIZZI, A.; EATON, N.A.; BARISKA, M. 1987: Theoretical water sorption energies by conformational analysis Part 2: Amorphous Cellulose and the sorption isotherm. *Wood Sci. Technol.* 21, S. 317-327
- RANTA-MAUNUS, A. 1990: Impact of mechano-sorptive creep to long-term strength of timber. *Holz Roh- Werkst.* 48, S. 67-71
- RECHENBERG, P. 1996: Kapitel J: Technische Informatik. *Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. 30. Auflage. Springer-Verlag
- REID, R. C.; PRAUSNITZ, J. M.; POLING, B. E. 1987: the properties of gases and liquids. 4. Ed. New York: McGraw-Hill
- RESSEL, J. 1986: Untersuchungen über den Energieverbrauch bei der technischen Schnittholztrocknung und Möglichkeiten zu dessen Verringerung. *Dissertation Universität Hamburg*
- RESSEL, J. 1993: Zum aktuellen Stand der Vakuumtrocknung von Schnittholz. *Holz-Zentralblatt*, Nr. 78, 79, S. 1274, 1276, 1278, 1313, 1314, 1316
- SAMAL, E.; BECKER, W. 1983: *Grundriß der praktischen Regelungstechnik*. 18. Auflage. Oldenbourg Verlag

- SIAU, J. F. 1984: *Transport processes in wood*. Springer-Verlag
- SIMPSON, W. T. 1973: Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and Fiber* 3, Nr. 1, S.41-49
- UNBEHAUEN, H. 1996: Kapitel I: Regelungs- und Steuertechnik. *Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. 30. Auflage. Springer-Verlag
- VERMAAS, H. F. 1978: Humidity – a review of the fundamental concepts pertinent to the drying of timber. *Wood Southern Africa*. S. 11-16
- VOIGT, H.; KRISCHER, O.; SCHAUSS, H. 1940: die Feuchtigkeitsbewegung bei der Verdunstungstrocknung von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 3, Nr.10, S. 305-321
- WELLING, J. 1986: Kontinuierliche Messung von Holzfeuchteprofilen während der Schnittholztrocknung. *Holz Roh- Werkst.* 44, Nr. 9, S. 361
- WELLING, J. 1987: Technische Neuerungen für die Schnittholztrocknung. 1. Teil: Verfahrenstechnik. *HOB Holzbearbeitung* 34, Nr. 3, S. 50-53
- WELLING, J. 1988: Die modellmäßige Erfassung von Trocknungsspannungen während der Kammertrocknung von Schnittholz. *Holz Roh- werkst.* 46, Nr. 8, S. 295-300
- WELLING, J. 1989: Moderne Trocknungstechnik: Wo bleibt der Erfahrungsschatz?. *HOB Holzbearbeitung*, S. 8
- WELLING, J. 1990: Trends in der Schnittholztrocknung. *HOB Holzbearbeitung*, S. 44-48
- WELLING, J. 1990: Ursachen und Nachweis von Trocknungsspannungen und Verschaung. *HOB Holzbearbeitung*, S. 82-84
- WELLING, J. 1990: Zur Problematik der technischen Trocknung von Fichtenholz mit großen Querschnittsabmessungen. *Holz-Zentralblatt* 116, Nr. 126, S. 1941, 1942
- WELLING, J. 1993: Reduzierung von Trocknungsschäden durch Vakuum-Heißdampftrocknung. *Drei-Länder-Holztagung, Garmisch-Partenkirchen*, S. 229-235
- WELLING, J. 1994: EDG-Richtlinie "Trocknungsqualität". Ein neues Werkzeug für die europäische Holzwirtschaft. *Proceedings 6. Internationales EDG-Trocknungsseminar, Hamburg*, S. 1-10
- WELLING, J.; DREINER, K. 1992: Entwicklung von interaktiven, selbst adaptierenden Reglern für Trocknungsprozesse (insbesondere für Schnittholztrockner). *AiF-Forschungsbericht*
- WELLING, J., FORTUIN, G. 1988: Die Berücksichtigung von Feuchtegradienten und Trocknungsspannungen bei der Steuerung der Schnittholztrocknung. *Mitt. BFH, Hamburg* 160, S. 371-381

WENGERT, E. 1976: Predicting average moisture content of wood in a changing environment. *Wood and Fiber* 7, Nr. 4, S. 264-2

ZIEREP, J. 1993: *Grundzüge der Strömungslehre*. 5. Auflage. Springer-Verlag

### **Nicht publizierte Quellen**

WELLING, J. 1999: „mündliche Mitteilung“, BFH, Hamburg, Institut für Holzphysik

