

Holztechnologie I: Holzbe- und Verarbeitung

Educational Material**Author(s):**

Niemz, Peter; Bächle, F.; Sonderegger, Walter

Publication date:

2000

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004537246>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Holztechnologie 1

Inhaltsverzeichnis zu Kapitel 2

2. Grundprozesse der Holzbe- und Verarbeitung	3
2.1. Trennen	3
2.1.1. Schnittarten.....	3
2.1.2. Geometrie am Schneidkeil.....	5
2.1.3. Grundbegriffe des Zerspanens	6
2.1.3.1. Schnittgeschwindigkeit.....	6
2.1.3.2. Vorschubgeschwindigkeit.....	6
2.1.3.3. Eingriffsgrösse	6
2.1.3.4. Zahnvorschub.....	6
2.1.3.5. Schnittgüte	6
2.1.3.6. Spanungskräfte.....	7
2.1.3.7. Schneidwerkstoffe	8
2.1.3.8. Schneidenverschleiss.....	8
2.1.4. Systematik von Trennvorgängen	9
2.1.4.1. Teilen	10
2.1.4.2. Spanen	11
2.1.4.3. Sägen	11
2.1.4.4. Fräsen.....	11
2.1.4.5. Bohren	11
2.1.4.6. Schleifen.....	13
2.1.5. Übersicht zu Maschinen der Holzindustrie	15
2.2. Holz Trocknung	18
2.2.1. Grundlagen	18
2.2.2. Qualitätskontrolle bei der Holz Trocknung.....	23
2.2.3. Methoden der Holz Trocknung	26
2.2.3.1. Allgemeine Grundlagen.....	26
2.2.3.2. Freilufttrocknung.....	27
2.2.3.3. Verdunstungstrocknung.....	28
2.2.3.4. Verdampfungstrockner (Hochtemperaturtrocknung)	29
2.2.3.5. Vakuumtrocknung.....	30
2.2.3.6. Sonstige Trocknungsverfahren.....	31
2.3. Dämpfen.....	32
2.3.1. Zweck	32
2.3.2. Ablauf	32
2.3.3. Dampfverbrauch	33
2.3.4. Dämpfzeiten.....	33
2.3.5. Kochen	34
2.4. Kleben.....	35
2.4.1. Allgemeines	35
2.4.2. Einteilung der Klebstoffe	36
2.4.3. Klebevorgang	37
2.4.4. Klebetheorien	39
2.4.4.1. Van der Waalsche Kräfte.....	40
2.4.4.2. Wasserstoff-Brückenbindungen	41
2.4.4.3. Chemische Bindungen.....	41

2.4.4.4. Vergleich der Bindungsarten.....	41
2.4.5. Einfluss des Holzes auf die Verklebungsgüte.....	42
2.4.6. Klebgrundoperationen.....	42
2.4.7. Beschreibung ausgewählter Klebstoffe.....	43
2.4.7.1. Klebstoffe auf Basis natürlicher Ausgangsmaterialien.....	43
2.4.7.2. Synthetische Klebstoffe.....	45
2.4.8. Wichtige Gebrauchseigenschaften von Klebstoffen.....	49
2.5. Holzvergütung.....	51
2.5.1. Chemisch.....	51
2.5.1.1. Acetylierung.....	51
2.5.1.2. Phtalierung.....	52
2.5.1.3. Ammoniak.....	52
2.5.1.4. Polymerholz.....	52
2.5.2. Biologisch.....	53
2.5.2.1. Natürliche Holzschutzmittel.....	53
2.5.2.2. Enzymatische Modifikation.....	53
2.5.2.3. Myko-Holz.....	53
2.5.2.4. Enttoxifikation von Altholz.....	53
2.5.3. Physikalisch.....	54
2.5.3.1. Thermische Behandlung.....	54
2.5.3.2. Strahlentechnische Vergütung.....	56
2.5.4. Mechanisch (Druck).....	57
2.5.5. Verformung von Holz.....	59
2.6. Literatur zu Kapitel 2.....	62

2. Grundprozesse der Holzbe- und Verarbeitung

2.1. Trennen

2.1.1. Schnittarten

Abbildung 1 zeigt die Schnittarten für verschiedene Materialien.

Bei Vollholz und Lagenholz:

- A: Schnittfläche senkrecht zur Faser; Schnittrichtung praktisch ohne Bedeutung; grosser Energiebedarf; rauhe Schnittfläche.
- B: Schnittfläche parallel zur Faser; Schnittrichtung parallel zur Faser, entspricht Längsschnitt; Energiebedarf gering; glatte Schnittfläche.
- C: Schnittfläche parallel zur Faser; Schnittrichtung senkrecht zum Faserverlauf, entspricht Querschnitt; Energiebedarf geringer als bei B; rauhere Oberfläche.

Praktisch kommen meist Mischungen zwischen A und B vor.

Man unterscheidet Schneiden mit und gegen die Faser (Abbildung 2 und Abbildung 3).

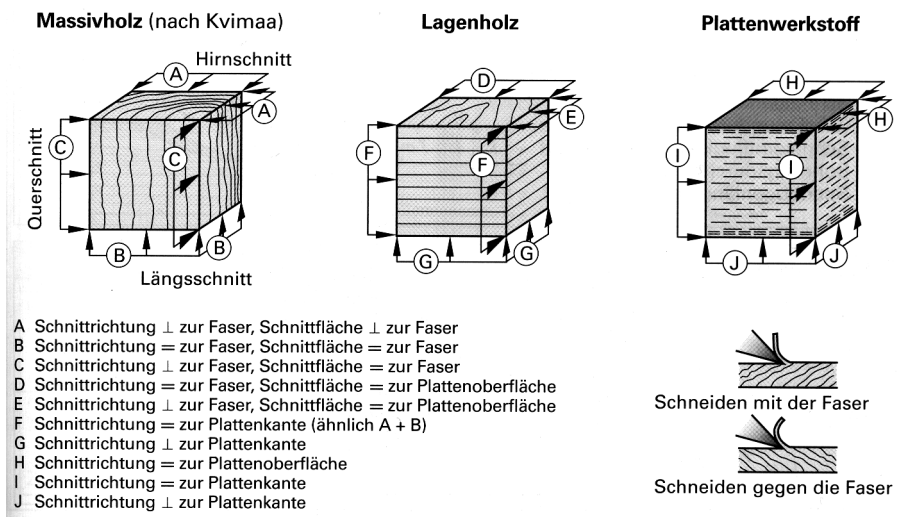


Abbildung 1 Schnittarten

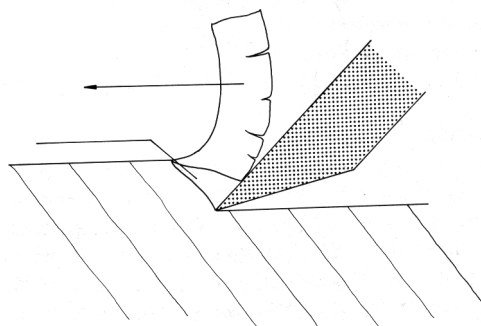


Abbildung 2 Schneiden mit der Faser

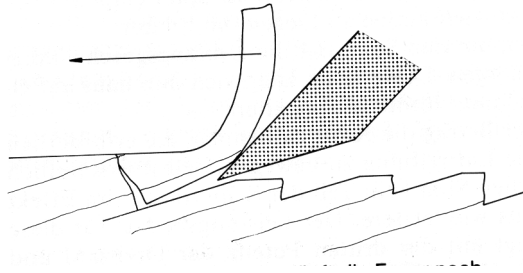


Abbildung 3 Schneiden gegen die Faser

Das Vorspalten beim Schneiden gegen die Faser kann durch Gegendruck vermindert werden. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel an Hand des Schälvorganges.

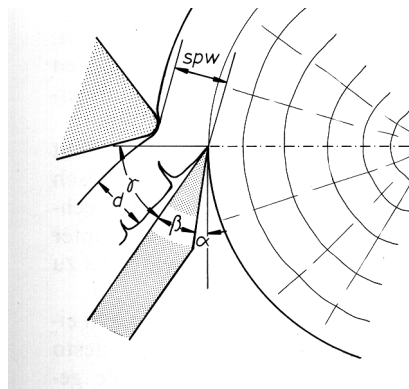


Abbildung 4 Schälen von Holz, Druckleiste zum Verhindern des Vorspaltens

Bei Span- und Faserplatten entspricht:

- A: Schnittfläche senkrecht zur Plattenbreitfläche
- B: Schnittfläche parallel zur Plattenbreitfläche

2.1.2. Geometrie am Schneidkeil

Tabelle 1 zeigt wichtige Begriffe für das Trennen des Holzes.

Tabelle 1 Begriffe für die Holztrennung

Begriff	Erläuterung
Schnittfläche	Am Werkstück von einer Schneide momentan erzeugte Fläche, Hauptschneiden erzeugen Hauptschnittflächen, Nebenschneiden Nebenschnittflächen
Wirkliche Oberfläche	Summe der am Werkstück verbliebenen Schnittflächenteile
Schneidkeil	Teil des Werkzeuges, an dem der Span durch die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück entsteht
Werkzeugschaft	Teil des Werkzeuges, an dem sich der Schneidkeil befindet und der zum Befestigen des Werkzeuges in der Werkzeugaufnahme dient
Freifläche	Fläche am Schneidkeil, die der entstehenden Schnittfläche zugekehrt ist. An Hauptfreiflächen befinden sich die Hauptschneiden, an Nebenfreesflächen die Nebenschneiden
Spanfläche	Fläche am Schneidkeil, auf der der Span abläuft
Hauptschneide	Schnittlinie zwischen Frei- und Spanfläche, deren Schneidkeil bei Betrachtung in der Arbeitsebene in Vorschubrichtung weist
Nebenschneide	Schnittlinie zwischen Freifläche und Spanfläche, deren Schneidkeil bei Betrachtung in der Arbeitsebene nicht in Vorschubrichtung weist
Schneidenecke	Ecke, an der eine Haupt- und eine Nebenschneide mit gemeinsamer Spanfläche zusammentreffen. Sie kann gerundet oder gefast sein

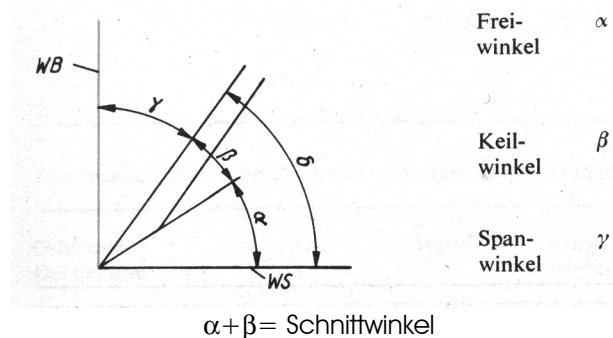


Abbildung 5 Schneidengeometrie

Die Schneidengeometrie entscheidet über die Schnittkraft bzw. Antriebsleistung und die erzielbare Oberflächenqualität. Der Freiwinkel liegt im allgemeinen bei 1 bis 20° (Sonderfall Furnierschalen dort -1°, der Keilwinkel zwischen 25-60°, der Schnittwinkel zwischen 25-80°).

2.1.3. Grundbegriffe des Zerspanens

Folgende wichtige Begriffe gelten:

2.1.3.1. Schnittgeschwindigkeit

Geschwindigkeit, mit der die Schneide eines Werkzeuges spanende Bewegungen im Werkstück ausführt.

Es gilt für rotierende Werkzeuge: $V = \pi * d * n$

Dabei sind:

- n: Drehzahl
- v: Schnittgeschwindigkeit
- d: Durchmesser des Flugkreises des Werkzeuges

2.1.3.2. Vorschubgeschwindigkeit

$$u = s_z * z_w * n$$

dabei sind:

- s_z : Zahnvorschub
- z_w : wirksame Schneidenzahl

2.1.3.3. Eingriffsgrösse

Die Eingriffsgrösse e ist die Grösse des Eingriffes der Schneide je Hub oder Umdrehung.

2.1.3.4. Zahnvorschub

$$s_z = \frac{D * \pi * n}{1000 * 60}$$

- D: Werkzeugdurchmesser
- n: Drehzahl

2.1.3.5. Schnittgüte

Die Schnittgüte wird durch die Welligkeit, Rauigkeit und Kantenausbrüche bestimmt. Zusätzlich können Formabweichungen durch Schwingungen des Werkstückes infolge ungleichmässiger und unzureichender Führung oder durch Durchbiegen entstehen. Die Welligkeit macht sich speziell auf der Arbeitsfläche bemerkbar und entsteht beim Umfangsfräsen. Sie wird durch die Messerschlagtiefe oder die Messerschlaglänge bestimmt. Messerschlagtiefe und Länge sind voneinander abhängig.

Abbildung 6 zeigt schematisch die Entstehung der Welligkeit beim Fräsen.

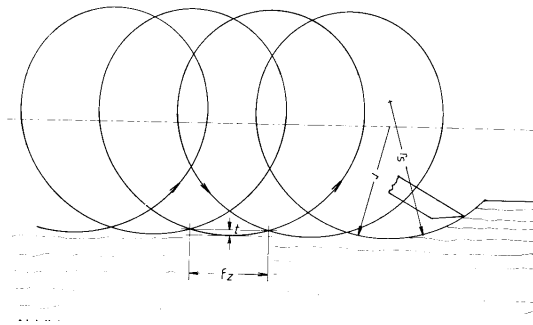


Abbildung 6 Entstehung der Welligkeit beim Fräsen von Holz

Theoretisch müsste die Messerschlaglänge genauso gross sein wie der Zahnvorschub. Praktisch ist aber zu beachten, dass niemals alle Schneiden auf dem gleichen Flugkreis liegen. Es ist daher zweckmässiger, mit weniger Schneiden aber höheren Drehzahlen zu arbeiten. Die Messerschlaglänge kann als Kenngrösse der Oberflächenqualität verwendet werden.

Die Messerschlagtiefe t berechnet sich für das Umfangsfräsen wie folgt aus der Messerschlaglänge:

$$t = \frac{d}{2} - \frac{1}{2} * \sqrt{(d^2 - s_M^2)}$$

$$s_M = 2\sqrt{t(d-t)}$$

- t: Messerschlagtiefe
- s_M : Messerschlaglänge
- d: Flugkreisdurchmesser

Für das Umfangsfräsen gelten folgende Ansprüche:

Tabelle 2 Schnittgüte in Abhängigkeit von der Messerschlagtiefe

Ansprüche	Messerschlagtiefe in μm	Gefordert bei
hoch	0,03 bis 0,3	Sichtbaren Möbelteilen, die nicht nachgeschliffen werden
mittel	0,3 bis 1,2	Profilfräsungen bei Möbelteilen, die nachgeschliffen werden
gering	1,2- 10	Konstruktionsfräsungen wie Nut und Feder

2.1.3.6. Spanungskräfte

Die Kraft an der Schneide, resultierende Schnittkraft genannt, umfasst die Trenn-, Verformungs- und Reibungskraft.

Folgende Schnittkräfte gelten bei Spandicken von 0,1-0,2 mm.

Sägen: $K_s = 30-70 \text{ N/mm}^2$

Fräsen: $K_s = 10-120 \text{ N/mm}^2$
 Bohren: $K_s = 40-100 \text{ N/mm}^2$

2.1.3.7. Schneidwerkstoffe

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht zu wesentlichen Schneidstoffen für Holz und Holzwerkstoffe.

Für Holzwerkstoffe (Spanplatten, MDF) wird überwiegend Hartmetall, teilweise auch polykristalliner Diamant eingesetzt.

Tabelle 3 Schneidstoffe für Holz und Holzwerkstoffe

Schneidstoffe			
Kurzzeichen	Werkstoff	Verwendung	Eigenschaften
WS	Werkzeugstahl, unlegiert	ohne Bedeutung	Verschleiß: + groß, - gering Härte: + spröde, - elastisch
SP	Werkzeugstahl, < 5% Legierungsanteil	Stecheisen, Hobeisen, Bandsägen, Holzbohrer	
HL SS	Schnellarbeitsstahl, < 12% Legierungsanteil	Holzbohrer, Metallbohrer	
HS HSS	hochlegierter Schnellarbeitsstahl, > 12% Legierungsanteil	Holzbohrer, Metallbohrer, Schneiden für Fräser, Streifenhobelmesser	
ST	Stellit, geschmolzene Legierung ohne Stahlanteile	Streifenhobelmesser, Bestückung für Fräser und Bandsägen	
HW	Hartmetall, Sintermetall ohne Stahlanteile, in der Praxis übliche Zerspanungsgruppe K 05 ... K 20	Bestückung für Kreissägen, Fräser, Bandsägen, Bohrer	
DP	Polykristalliner Diamant mittlere Korngröße $2 \mu\text{m} \dots 25 \mu\text{m}$	Bestückung für Kreissägen, Fräser, Bohrer	

2.1.3.8. Schneidverschleiss

Unter Schneidverschleiss verstehen wir das allmähliche Abtragen von Schneidstoff während der Bearbeitung.

Es wird verursacht durch:

- Mechanischen Abrieb (Ausbrechen von Gefügeteilchen)
- Kraterbildung und Verbrennung durch Funkenüberschlag bei hoher elektrostatischer Aufladung (Reibungselektrizität)
- Korrosion durch im Material vorhandene Säuren

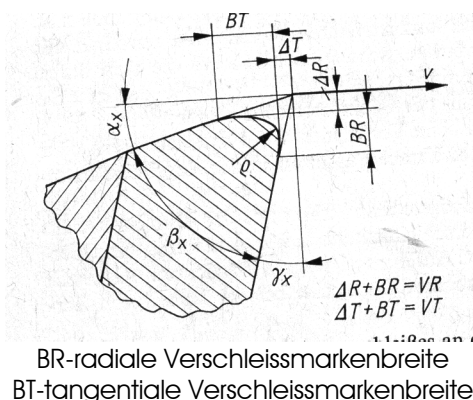
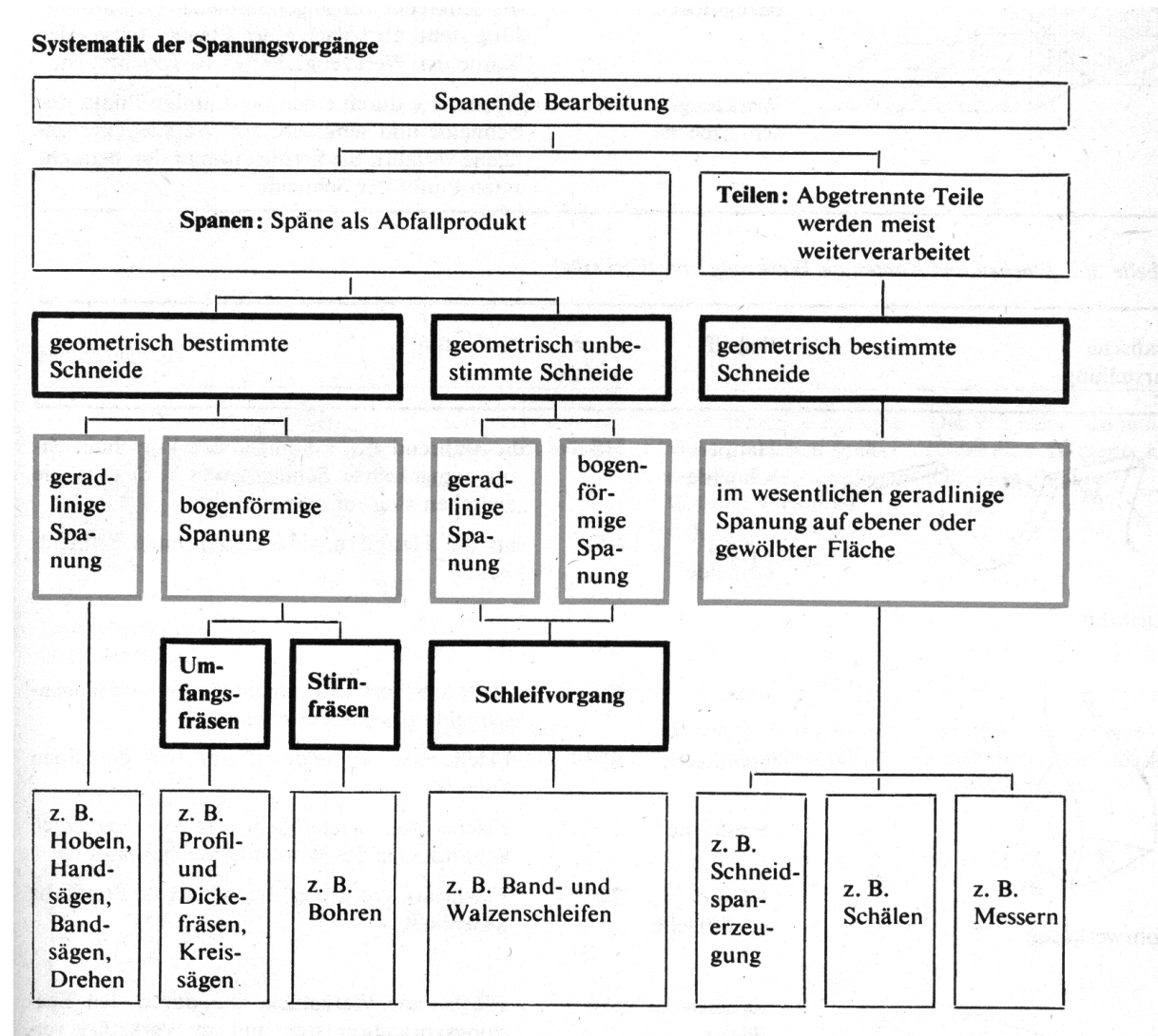


Abbildung 7 Verschleiss an einer Schneide

2.1.4. Systematik von Trennvorgängen

Tabelle 4 zeigt eine Systematik wichtiger Trennvorgänge.

Tabelle 4 Systematik von Trennvorgängen



2.1.4.1. Teilen

Schneiden (z.B. Furnierpaket Schneiden)

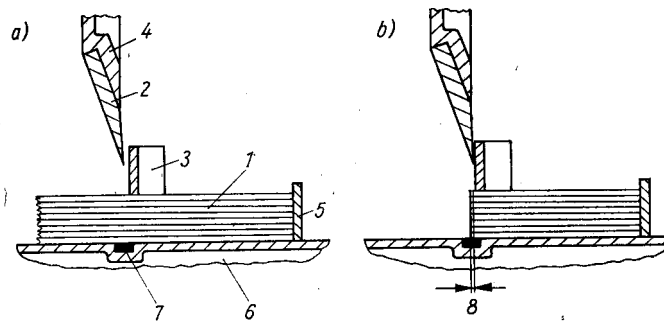


Abbildung 8 Schneiden

1-Furnierpaket, 2- Messer, 3-Druckbalken, 4-Messerbalken, 5-Anschlag, 6-Maschinentisch

Scheren (Aufteilen von Furnierbändern)

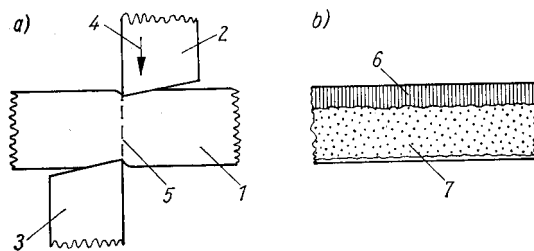


Abbildung 9 Prinzip des Scherens

1-Werkstück, 2-Obermesser, 3-Untermesser, 4-Arbeitsrichtung Obermesser, 5-Trennschnitt, 6-durch schneidendes Eindringen des Messers entstandener Trennfächenteil, 7- durch Überwinden der Scherfestigkeit entstandener Teil

Stanzen (Austausflicken, Herstellung von Lammello-Verbindungen)

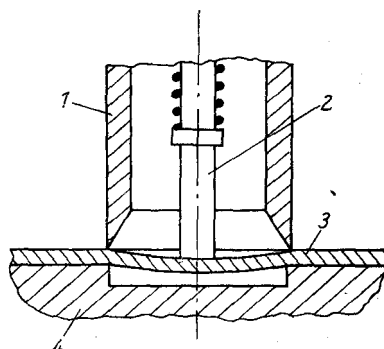


Abbildung 10 Stanzen

1-Schnittstempel, 2-federbelasteter Vordruckstempel, 3-Spanplatte

Vibrationsschneiden

2.1.4.2. Spanen

Folgende Verfahren sind üblich:

2.1.4.3. Sägen

Hierunter zählen Bandsägen, Kreissägen, Kettensägen.
Abbildung 13 zeigt typische Sägen.

2.1.4.4. Fräsen

Abbildung 11 zeigt einen Fräser. Folgende wesentlich Maschinengruppen zählen zum Fräsen:

Abrichtfräsen, Dickenfräsmaschinen, Unterfräsmaschinen, Mehrseitenfräsmaschinen, Oberfräsmaschinen.

Das Fräsen ist neben dem Sägen das gebräuchlichste Bearbeitungsverfahren.

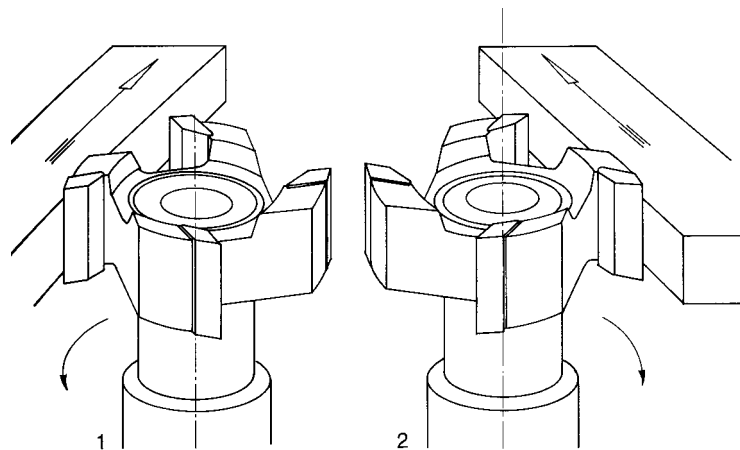


Abbildung 11 Fräsen

2.1.4.5. Bohren

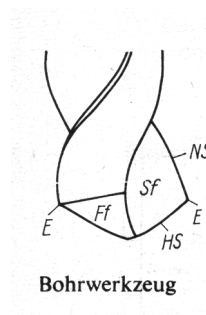


Abbildung 12 Bohrer

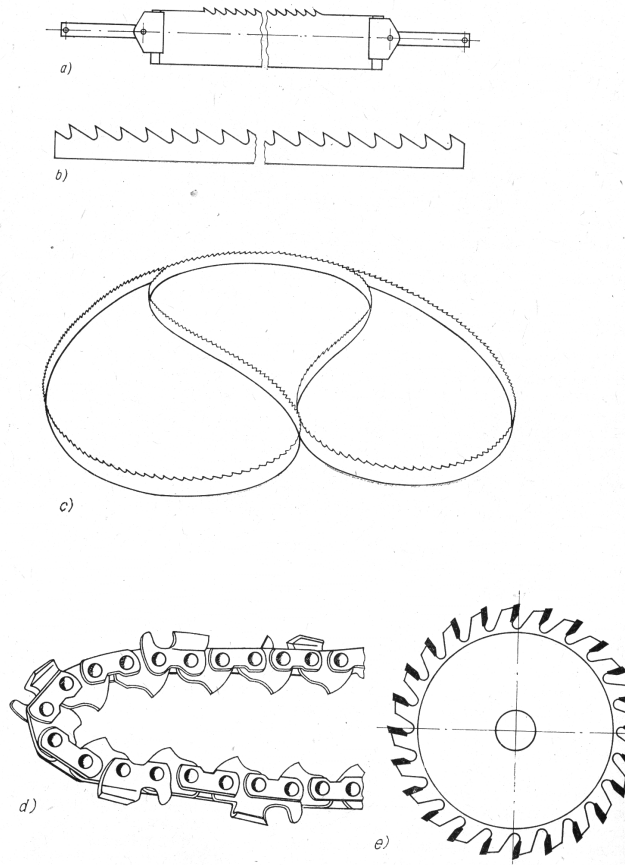


Abbildung 13 Sägeblätter: a) Gattersäge, b) Dekupiersäge, c) Bandsäge, d) Kettensäge, e) Kreissäge

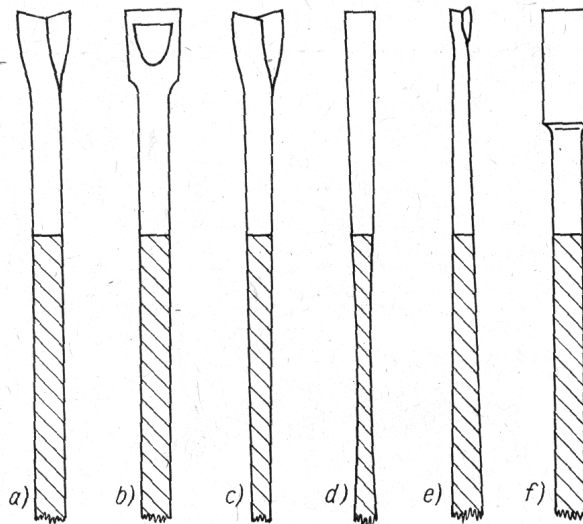


Abbildung 14 Kreissägeblätter

a) mit Schrank, b) mit Stauchung, c) konisch, d) Hobelkreissägeblatt, e) Spaltkreissägeblatt, f) bestücktes Sägeblatt

2.1.4.6. Schleifen

Tabelle 5 zeigt wichtige Parameter von Schleifmitteln.

Tabelle 5 Schleifmittel und deren Parameter

Schleifpapiere und Schleifgewebe werden zum Schleifen von Holz, Holzwerkstoffen, Lacken, Kunststoffen und Metalloberflächen benutzt. Zum Schleifen von Werkzeugen dienen Schleifscheiben und Abziehsteine.

Aufbau von Schleifpapieren und Geweben		
	1	Schleifkorn
	2	Deckbinder
	3	Grundbinder
	4	Unterlage

Schleifkornwerkstoffe			
	Werkstoff	Härte nach Mohs	Typischer Einsatz
natürlich	Granat (Ruby)	7 ... 7,5	Weiches Holz Handschliff
	Schmirgel	7,5 ... 8	Feinschliff, Buntmetalle
synthetisch	Schwarzer Korund	ca. 7	Weichholzschliff grobe Körnung
	Braunkorund	8 ... 9	Weiche Holzarten Metalle
	Halbedel-Korund (Rosa)	9,2	Maschinenschliff auch bei harten Hölzern, Metalle
	Elektrokorund (Weiß-)	9,3	Maschinenschliff bei harten Hölzern Kunststoffe, Metalle
	Siliziumkarbid	9,6	Spanplatten, MDF Glas, Stein, Metalle, hochbeanspruchte Schleifbänder
	Bornitrid Diamant	 10	 Hochlegierte Stähle Hartmetall

Unterlagen	
Material	Einsatz
A-Papiere	Fein- und Handschliff, trocken
B-Papiere	Hand- und Rutscherschliff, trocken Bandschleifmaschinen
C-Papiere	wie B, Feinschliff, Schleifscheiben (kleiner Durchmesser), Nassschliff
D-Papiere	wie C, Maschinenschliff mit flexiblen Bändern
E-Papiere	Maschinenschliff mit hoher Anforderung
J-Gewebe	Kanten- und Profilschliff, Leistungsschliff
J-Flex-Gewebe	Profilschliff, mehrfache Flexung
X-Gewebe	Fußbodenschleifmaschinen
XS-Gewebe	Maschinenschliff, hohe Leistung
Y-Gewebe	Hochleistungsschliff
I-Flex-Fiber	Profilschliff, hohe Standzeit
I-Fiber; X-Fiber	Schleifen von Spanplatten
Kombinationen	Breitband- und Zylinderschleifmaschinen

Bindungswerkstoffe		
Grundbinder	Hautleim, Kunstharz	
Deckbinder	Hautleime, Kunstharz, Füllstoffe	
Eigenschaften und Anwendung der Binder		
Art	Eigenschaft	Anwendung
Hautleim	trockenfest	weicher Schliff bei mäßiger Anwendung, niedrige Temperatur- beständigkeit
Hautleim + Kunstharz	feuchtfest	normale Temperatur- beständigkeit und Anforderung
Kunstharz	wasserfest	hohe Schleifleistung und Temperaturbestän- digkeit, harter Schliff

Streuerung	
geschlossen	
cl	Schleifkörner ohne Abstand auf der Unterlage höhere Abtragsleistung für harte und kurzspanende Werk- stoffe
offen	
op	bis zu 60% der Unterlage sind be- streut, weiche Hölzer, Farben und Lacke Aluminium grobe Schleifarbeiten
halboffen 1/2 op	Erwärmung und Zusetzen geringer

Korngröße			
Die Korngröße wird mit einer Nummer bezeichnet. Bei Körnungen aus Siliziumkarbid und Elektrokorund auf Unterlagen mit ganz bestimmter Korngrößenverteilung (FEPA-Standard) wird ein P vorgesetzt.			
Die Kornnummer entspricht der Anzahl der Sieböfnungen pro Zoll (25,4 mm) Länge einer Siebseite.			
Körnungen ab P240 werden durch Sedimentation (Absinken in Alkohol gefülltem Fallrohr) festgelegt.			
Makrokörnung		Mikrokörnung	
Kornnummer	Korngröße (µm)	Kornnummer	Korngröße (µm)
12	1760	240	58,5
bis	bis	bis	bis
220	65	2500	8,5

Tabelle 6 Körnungen für Schleifmittel

Körnung und Einsatzgebiete																
Körnung	sehr grob			mittel				fein			sehr fein			extra fein		
	16	24	36	40	50	60	80	100	120	150	180	220	240	280	320	360
Einsatz	Fußbodenschliff, Sonderarbeiten			Vorschleifen gehobelter und furnierter Flächen							Schleifen von Kunststoff, Lack und Spachtel					
	Entfernen alter Überzüge			Maschineller Vorschliff												
	Aufrauhern der Rückseite von HPL							Fertigschliff von Hand								
								Fertigschliff, maschinell			Lackfertigschliff von Hand und maschinell					

Tabelle 7 Anwendung von Schleifmitteln

Anwendung, Schleifmittelform und Kornbereich								
	Breitband	Kantenband Hülse	Langband	Profilband	Handschleifband	Streifen	Scheiben Bürsten	Bogen Rollen
Anwendung	Kornbereich							
Vorarbeiten								
Calibrieren von Massivholz/MDF Spanplatten	P80							
Calibrieren von Imleimern	P60 und P80							
Kanten bündig schleifen			P60 ... P80		P60 ... P100			
Kanten schleifen		P60 ... P120	P80 ... P120		P80 ... P120	P80 ... P150		P100 ... P150
Profile und Konturen schleifen				P100 ... P120				P80 ... P120
Strukturieren restaurieren							K46 ... K120	
Feinschleifen								
Flächen Massivholz/Furnier	P120 ... P220		P120 ... P220		P100 ... P150	P120 ... P180		P120 ... P180
MDF/Spanplatten	P120 ... P180		P120 ... P180					
Harzhaltiges Holz	P120 ... P180		P120 ... P180					
Konturen und Profile		P120		P120 ... P180				
Schleifen von Grundierungen/nach Wässern						P120 ... P180	P150 ... P180	P120 ... P180 K120 ... K180
Lackfeinschliff								
Flächenwischschliff	P220 ... P500		P220 ... P500			P220 ... P320	P220... P400	P220 ... P400

2.1.5. Übersicht zu Maschinen der Holzindustrie

Abbildung 15 zeigt eine Einteilung der Maschinen der Holzindustrie.

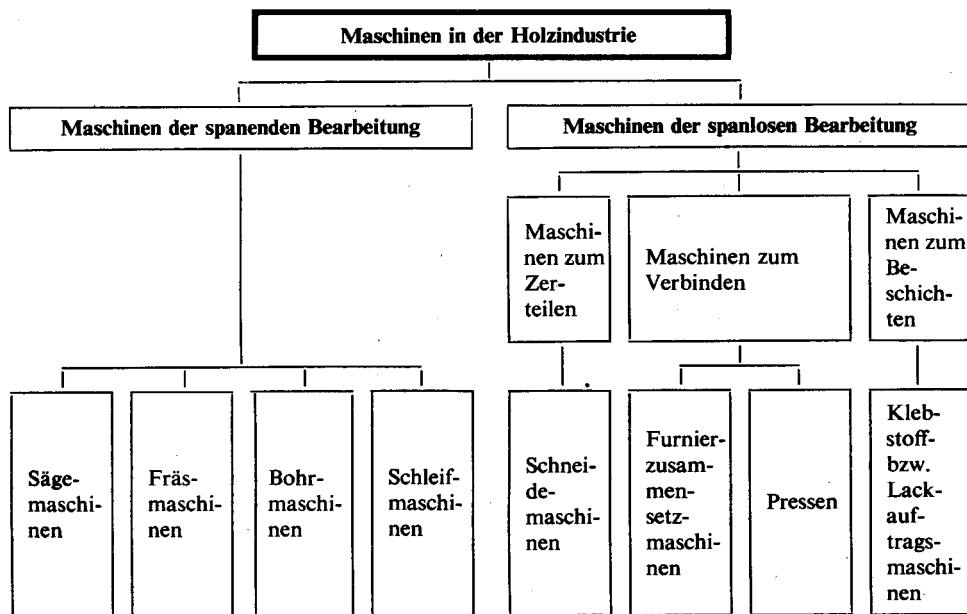


Abbildung 15 Einteilung von Maschinen der Holzindustrie

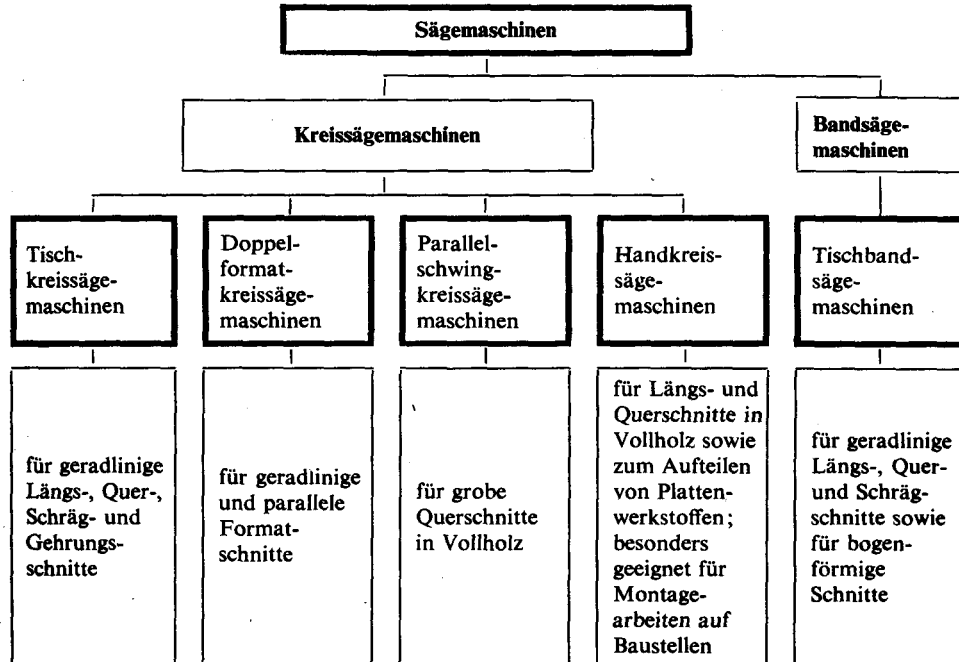


Abbildung 16 Sägemaschinen

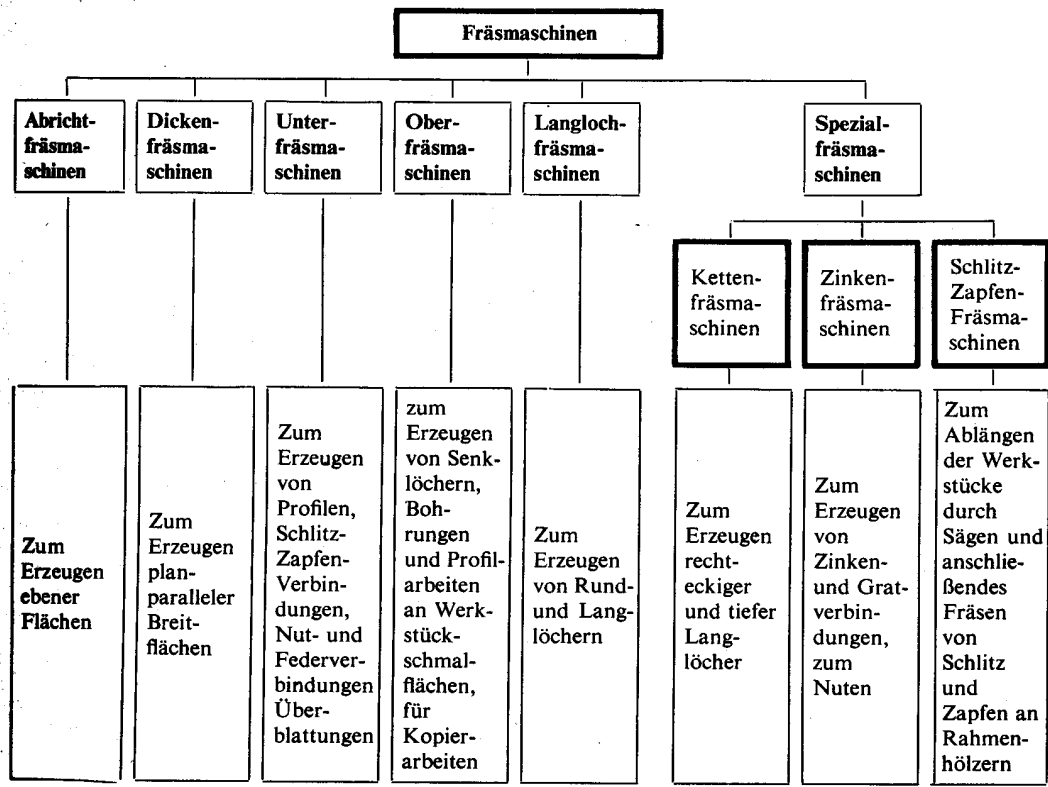


Abbildung 17 Fräsmaschinen

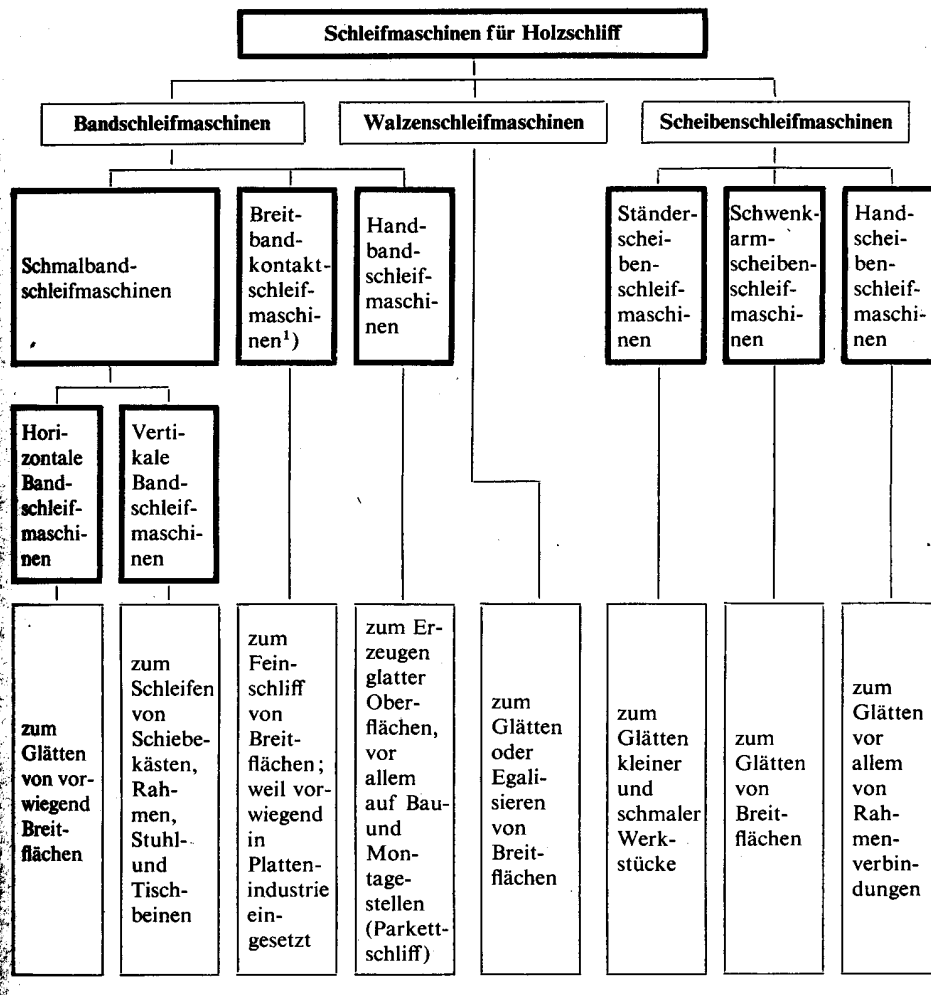


Abbildung 18 Schleifmaschinen

2.2. Holztrocknung

2.2.1. Grundlagen

Holz ist ein hygroskopischer Werkstoff. Die Holzfeuchte entspricht also den herrschenden äusseren Bedingungen. Sie ist abhängig von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte (Abbildung 19 und Abbildung 20). Die Feuchteänderung führt im hygroskopischen Bereich zum Schwinden, bzw. Quellen des Holzes. Die Eigenschaften sind feuchteabhängig. Zu nennen ist hier der Einfluss der Holzfeuchte auf den Pilzbefall, die Festigkeit und die Rissbildung / Verformung bei Feuchteänderung.

Ziel der Holztrocknung ist es, das Holz in kürzester Zeit qualitätsmässig einwandfrei und kostengünstig zu trocknen.

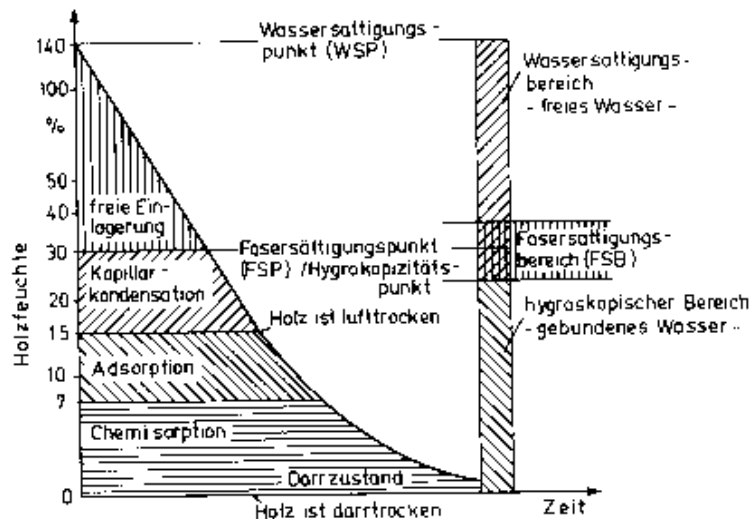


Abbildung 19 Sorptionsverhalten des Holzes

Die Holzfeuchte ist abhängig von der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte.

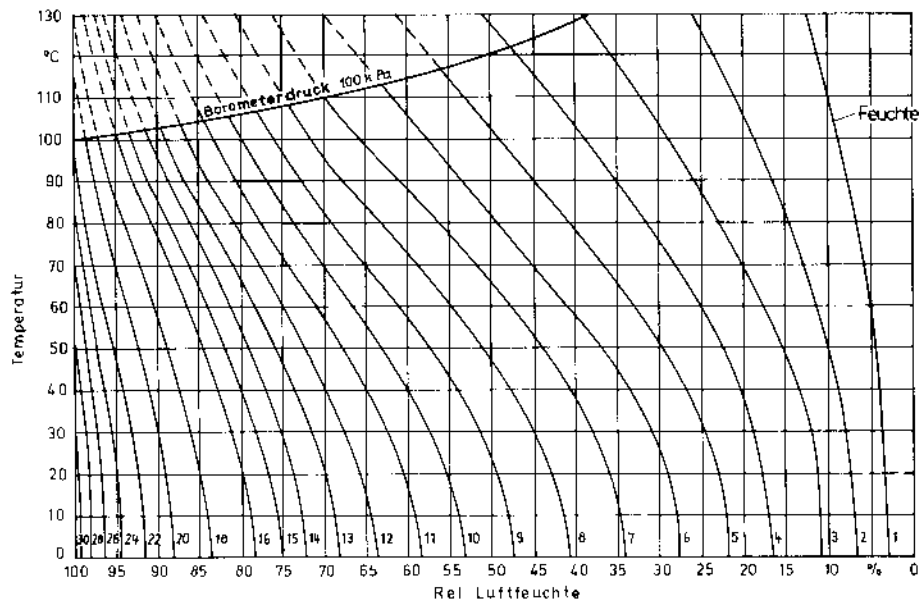


Abbildung 20 Gleichgewichtsfeuchte von Fichte als Funktion der Temperatur und der rel. Luftfeuchte

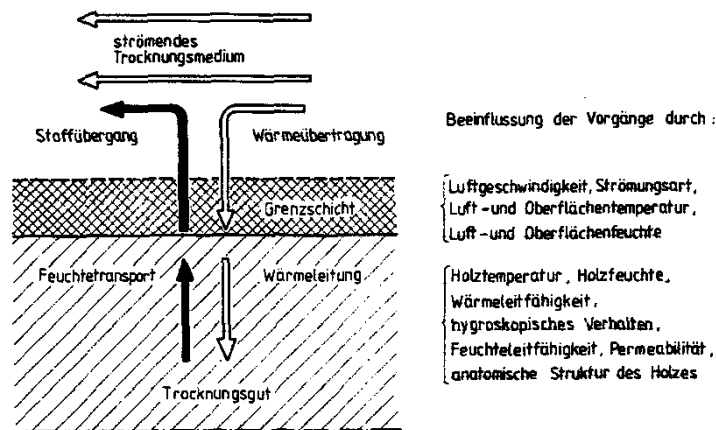


Abbildung 21 Schema der Vorgänge während der Holzrocknung:

Der Feuchtetransport im Holzinneren erfolgt durch Kapillarkräfte und Diffusion. Unterhalb des Fasersättigungsbereiches überwiegt die Diffusion. Durch Luftbewegung (Abtransport feuchter Luft) wird die Trocknungsgeschwindigkeit erhöht. Zur Steuerung des Trocknungsprozesses muss der Einfluss der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur auf die Holzfeuchte bekannt sein. Eine massgebliche Grösse für die Steuerung der Trocknung ist das Sättigungsdefizit der Luft, welches bei gleichbleibender absoluter Luftfeuchte (Wassergehalt in g/m^3) bei steigender Temperatur zunimmt (rel. Luftfeuchte sinkt).

Beträgt z.B. die absolute Feuchtemenge $7,52 \text{ g}/\text{cm}^3$, so ist die Luft bei 10°C zu 80% gesättigt, bei Aufwärmen der Luft auf 80°C nur noch zu 3,3% (siehe Abbildung 22). Strebte das Holz bei 10°C eine Gleichgewichtsfeuchte von ca. 16,5% an, so beträgt diese bei 80°C nur 1,7%. Bei der Holzrocknung ist also eine möglichst hohe Temperatur anzustreben, um das Holz schnell zu trocknen.

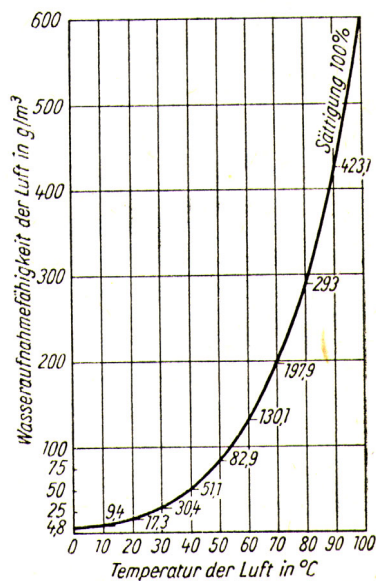


Abbildung 22 Abhängigkeit der Wasserdampfsättigungsmenge von der Lufttemperatur nach Janik

Eine Erhöhung der Trocknungstemperatur (Hochtemperaturtrocknung heute bis 120°C und darüber) führt aber zu Verfärbungen und Gefahr von Trocknungsfehlern (Rissbildung, Verformung, Zellkollaps).

Solche Hölzer sind möglichst schonend bei Temperaturen um 60°C bis zum Erreichen der Fasersättigung zu trocknen. Der Entzug des gebundenen Wassers kann dann bei höheren Temperaturen erfolgen.

Voraussetzung für eine gute Trocknung ist eine gleichmässige Strömung des Trocknungsmediums im Stapel.

Mit der Strömungsgeschwindigkeit steigt neben der Wärmeübergangszahl aber auch der Energiebedarf.

Nach Vorreiter sinkt die tatsächliche Trocknungszeit Z hyperbolisch bis zu einer maximalen Grenzgeschwindigkeit v_{\max} des Trocknungsmediums, je höher die rel. Luftfeuchte ist.

Die spezifische Trocknungszeit kann nach Kollmann wie folgt berechnet werden:

$$Z = \frac{1}{\alpha} * (\ln u_a - \ln u_e) * \left(\frac{d}{25}\right)^x * \left(\frac{65}{t}\right)^y$$

wobei:

- Z spezifische Trocknungszeit (h)
- U_a Anfangsfeuchte (%)
- U_e Endfeuchte (%)
- D Holzdicke (mm)
- α 0,003 bis 0,07
- x 1,25 für nasse, 1,5 für vorgetrocknete Hölzer
- Y 1,5 nach Krischer /Kast 1978 (siehe Tabelle 9)

Die Gesamtdauer der Trocknung setzt sich zusammen aus:

$$T_{\text{tot}} = T_{\text{erw}} + T + T_{\text{ko}} + T_{\text{ab}}$$

T_{tot} :	Gesamttrocknungszeit
T	spezifische Trocknungszeit
T_{erw} :	Erwärmungszeit für Kammer und Holz
T_{ko}	Konditionierungszeit
T_{ab}	Abkühlzeit

Folgende Kenngrößen sind bei der Trocknung von Bedeutung:

Das Holzfeuchtegefälle =(Feuchtegradient):

Darunter versteht man das sich bei der Trocknung über der Dicke einstellende Feuchteprofil. Das Feuchteprofil entsteht dadurch, das Holz zunächst an der Oberfläche abtrocknet. Unterhalb der Fasersättigung erfolgt der Feuchtetransport primär durch Diffusion.

Das Trocknungsgefälle:

Dieses ist das Verhältnis aus momentaner effektiver Holzfeuchtigkeit zur Gleichgewichtsfeuchte beim jeweiligen Klima.

Es gilt: $TG = \frac{u}{u_{gl}}$

U	momentane Holzfeuchte
U_{gl}	Gleichgewichtsfeuchte

Wäre $u=15\%$ und $u_{gl}=15\%$ so wäre das Trocknungsgefälle 1, es würde also kein Trocknungspotential mehr da sein. Wäre die momentane Holzfeuchte 12%, die Gleichgewichtsfeuchte 5%, so beträgt $TG = 2,4$.

Je höher TG, um so schneller trocknet Holz, um so eher entstehen Schäden.

Tabelle 8 zeigt Richtwerte (Fa. Bollmann) für das Trocknungsgefälle für verschiedene Holzarten, Tabelle 9 die Kennwerte für Alpha sowie die Trocknungstemperatur und das Trocknungsgefälle für verschiedene Holzarten.

Schwer zu trocknende Holzarten werden langsam getrocknet, grosse Dicken ebenso, da bei diesen ein ausgeprägteres Feuchteprofil über der Holzdicke entsteht. Kleine Holzdicken werden schneller getrocknet.

Das Trocknungsgefälle ist abhängig von der Holzart, der Holzdicke und der jeweiligen Holzfeuchte.

Das Trocknungsprogramm legt fest, wie sich die Trocknungsbedingungen im Verlauf der Trocknung verändern, es erfolgt eine Variation von Temperatur und relativer Luftfeuchte.

Abbildung 23 zeigt den schematischen Ablauf der Holz Trocknung.

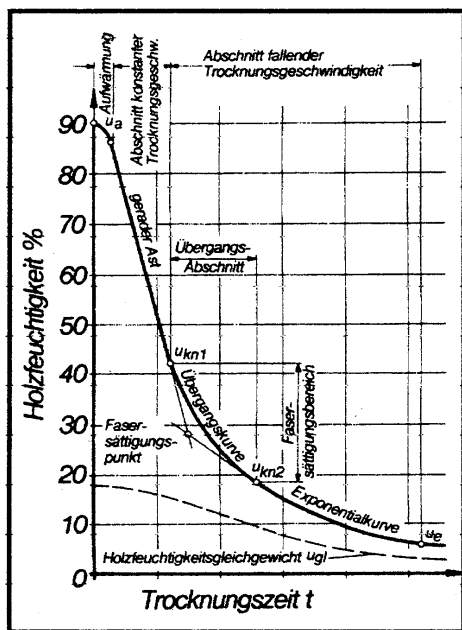


Abbildung 23 Schematischer Ablauf der Holz Trocknung

Tabelle 8 Richtwerte für das Trocknungsgefälle

Richtwerte zur Einstellung des geeigneten Trocknungsgefälles $\frac{u}{u_{gl}} = TG$										
KZ Kennziffer	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
	250		europ. - am. Nadelholz				800			$r_0 \text{ kg/m}^3$
	Fichte									
langsam	2.6	2.4	2.2	2.0	} Trocknungsgefälle $\frac{u}{u_{gl}}$ Potential					
normal	3.0	2.8	2.4	2.2						
schnell	4.0	3.5	3.0	2.8						
			europ. - am. Laubholz				900			$r_0 \text{ kg/m}^3$
			Buche				Eiche			
langsam	} $\frac{u}{u_{gl}} = TG$		2.6	2.4	2.2	2.2	1.8	1.8		
normal			2.8	2.8	2.4	2.4	2.2	2.0		
schnell			3.0	2.8	2.8	2.6	2.4	2.2		
			Exoten				1200			$r_0 \text{ kg/m}^3$
			leichte, weisse				schwere, rote			
			Sipo				Meranti			
langsam	} $\frac{u}{u_{gl}} = TG$		2.4	2.4	2.4	2.2	2.0	2.0		
normal			2.8	2.6	2.6	2.6	2.4	2.2		
schnell			3.5	3.2	3.2	3.0	2.8	2.6		

Beispiele :

Fichte : $r_0 = 430 \text{ kg/m}^3$ von 60% auf 15% , 50 mm
Normaltrocknung $\frac{u}{u_{gl}} = 2.4 - 2.8$

Buche : $r_0 = 600 \text{ kg/m}^3$ von 50% auf 8% , 40 mm
Normaltrocknung $\frac{u}{u_{gl}} = 2.4$

Sipo : $r_0 = 550 \text{ kg/m}^3$ von 60% auf 12% , 50 mm
Langsamtrocknung $\frac{u}{u_{gl}} = 2.2 - 2.4$

Tabelle 9 Werte für Alpha, das Trocknungsgefälle sowie die Trocknungstemperatur für verschiedene Holzarten

Holzart	teta (°C)						TG			alphaT
	u(>30)	u(30-60)	u(>60)	u(>30)	u(30-60)	u(>60)	u(>30)	u(30-60)	u(>60)	
Ahorn	60	55	55	70	65	65	3.8	3.6	3.4	0.0274
Aspe	60	60	55	75	70	65	4.4	4.4	4.4	0.038
Balsa	70	70	70	80	80	80	4.4	4.4	4.4	0.07
Birke	70	65	60	80	75	70	4.4	4.4	4.4	0.03
Birke	60	55	55	75	70	70	4.2	4.0	3.8	0.026
Birnbaum	60	55	50	70	65	60	4.0	3.8	3.6	0.026
Buche	60	55	55	75	70	70	4.2	4.0	3.8	0.021
Douglasie	70	70	65	80	80	80	4.4	4.2	4.0	0.04
Edelkastanie	50	50	45	70	65	65	3.8	3.6	3.4	0.0265
Eibe	50	50	45	70	65	65	4.4	4.2	4.0	0.0265
Eiche	45	45	40	75	70	65	4.0	3.8	3.6	0.009
Erle	60	55	50	80	75	70	4.4	4.4	4.4	0.04
Esche	60	55	50	80	75	70	4.4	4.2	4.0	0.032
Fichte	75	75	70	80	80	80	4.4	4.4	4.4	0.0689
Kiefer	75	70	65	80	80	80	4.4	4.4	4.4	0.0444
Kirschbaum	50	50	45	70	65	65	4.4	4.2	4.0	0.02
Lärche	70	65	60	80	75	70	4.4	4.4	4.4	0.03
Limba	60	55	55	80	75	70	4.4	4.4	4.4	0.0235
Linde	60	55	55	80	75	70	4.4	4.4	4.4	0.0348
Meranti (red)	60	55	50	80	75	70	3.6	3.4	3.2	0.0161
Nussbaum	50	50	45	80	75	70	3.0	2.8	2.6	0.0179
Okoume	60	55	50	80	75	70	4.4	4.4	4.4	0.0446
Pappel	70	65	60	80	75	70	4.4	4.4	4.4	0.0333
Platane	55	50	50	80	75	70	3.6	3.4	3.2	0.03
Robinie	55	50	50	80	75	70	3.2	3.0	2.8	0.0265
Rosskastanie	50	50	45	70	65	65	4.4	4.2	4.0	0.0265
Tanne	75	70	70	80	80	80	4.4	4.4	4.4	0.0532
Teak	55	50	50	80	75	70	3.0	2.8	2.6	0.0196

2.2.2. Qualitätskontrolle bei der Holz Trocknung

Folgende Parameter werden kontrolliert:

- Die Holzfeuchte und das Feuchteprofil
- Trocknungsbedingte Spannungen
- Verformungen
- Rissbildung (Aussen- und Innenrisse)
- Zellkollaps (entsteht durch Kapillarspannungen oberhalb der Fasersättigung, es handelt sich dabei nicht um Schwinderscheinungen, Kollaps tritt bei ausgewählten Holzarten (Eucalyptus) auf oder bei extrem schneller Trocknung)
- Farbänderungen, treten insbesondere bei Laubhölzern auf

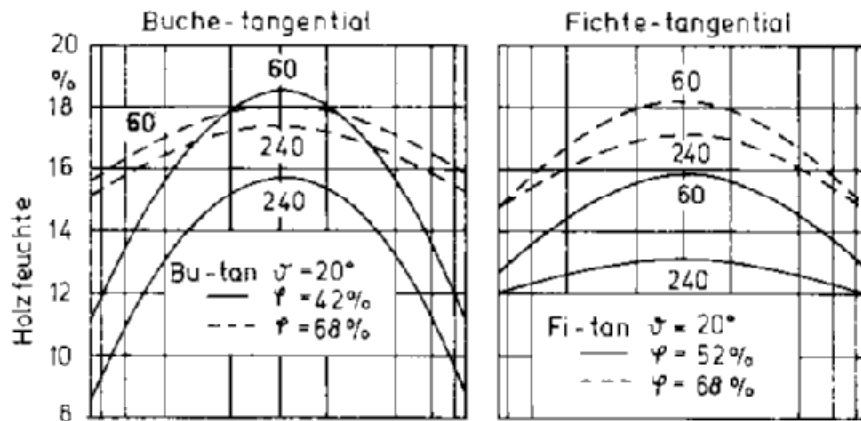


Abbildung 24 Feuchtegefälle über der Holzdicke bei der Trocknung in Abhängigkeit von der Zeit und der rel. Luftfeuchte



Abbildung 25 Ausbildung des Feuchteprofils und der Spannungen bei der Holz Trocknung

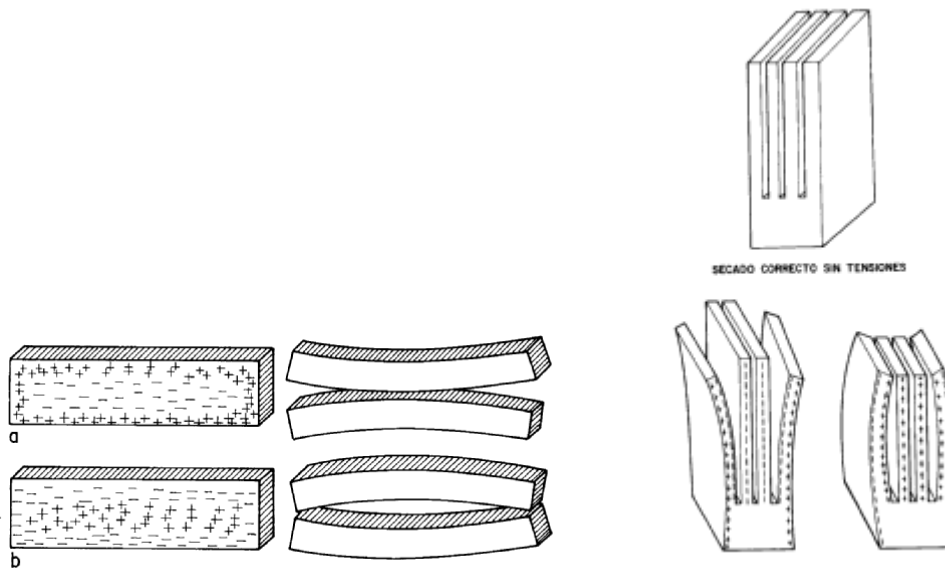


Abbildung 26 Methoden zum Nachweis von Trocknungsspannungen

Links: Trennschnitt → oben: aussen verschalt
 unten: innen verschalt

Rechts: Gabelprobe → oben: spannungsfrei
 unten rechts: innen verschalt (Zugspannungen innen)
 unten links: aussen verschalt (Zugspannungen aussen)

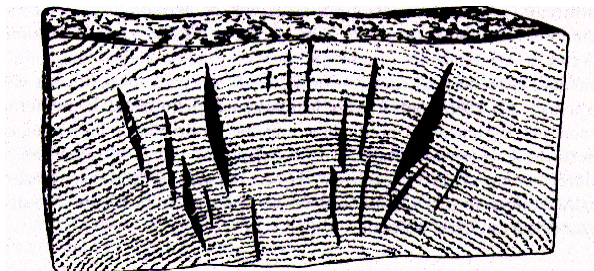


Abbildung 27 Zellkollaps

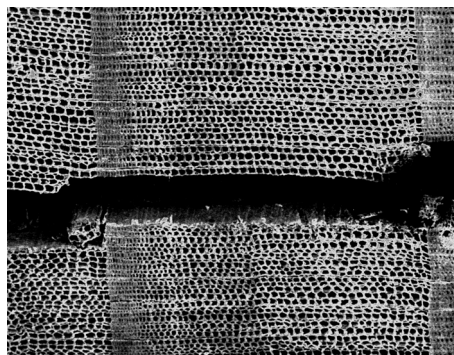


Abbildung 28 Trocknungsrisse in Fichte in tangentialer Richtung

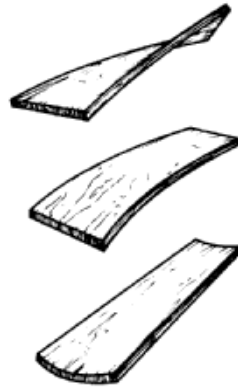


Abbildung 29 Verformungen im Holz

2.2.3. Methoden der Holz Trocknung

2.2.3.1. Allgemeine Grundlagen

Stapelung

Eine wichtige Vorbedingung für die einwandfreie Trocknung ist das richtige Stapeln des Holzes (Abbildung 30). Zwischen den Brettern müssen sogenannte Stapellatten vorhanden sein. Diese müssen exakt übereinander angeordnet werden. Bretter bis 40 mm Dicke werden Brett an Brett gestapelt, um den Trockner gut auszunutzen. Bretter über 40 mm werden mit einem Abstand zueinander gestapelt, welcher 30-40% der Kantholzdicke beträgt. Beim Stapeln wird allgemein die rechte Seite (Kernseite) nach oben gelagert, um ein Verschüsseln der Bretter zu verhindern. Dünne Ware neigt zum Verwerfen. Daher sollte diese in Doppellagen paarweise gegeneinander gestapelt werden (Abbildung 30). Dadurch werden Verformungen durch Trocknungsspannungen reduziert. Zusätzlich wird der Stapel häufig mit Betonplatten beschwert, um Verformungen der Bretter zu reduzieren.

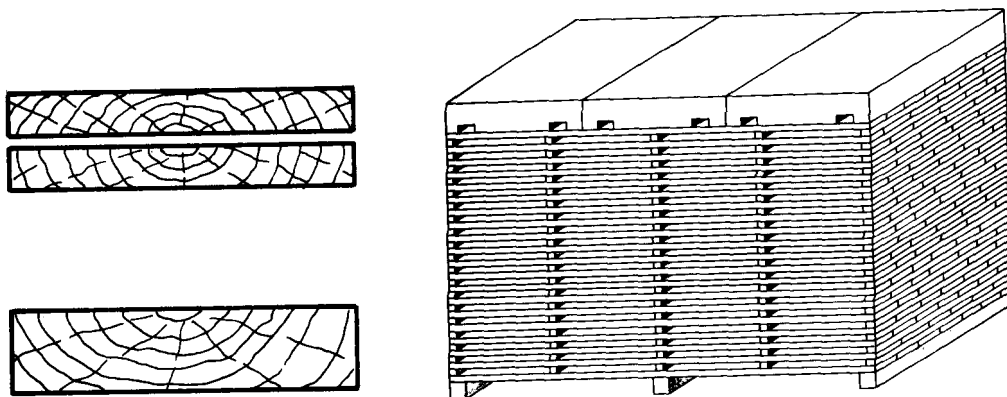


Bild 30

Abbildung 30 Links: Lagerung der Bretter (oben: dünne Ware paarweise; unten: übliche Anordnung, rechte Seite nach oben); Rechts: Holzstapel

Das Stapeln erfolgt manuell oder maschinell. Es sollten immer die gleichen Stapelleisten verwendet werden. Zu beachten ist, dass die Querschnitte bei der Benutzung schwinden.

2.2.3.2. Freilufttrocknung

Die Freilufttrocknung wird heute nur noch in kleinen Betrieben oder zur Vortrocknung angewandt.

Zu beachten sind folgende Hinweise:

- Die minimal erreichbare Holzfeuchte liegt zwischen 18-22% im Winter und 10-14% im Sommer (ein Einfluss der Holzdicke ist vorhanden)
- Ein genügend hoher Unterbau ist erforderlich (frei von Spritzwasser und Mikroklima)
- Die Stapelfläche ist frei von Gras etc. zu halten. Die Bodenfreiheit sollte mindestens 40-60cm betragen (Zementsockel, darüber Stapelunterlage)

	Stapellattendicken	Abstand der Latten
Holzdicke bis 20mm;	18 mm	500-700mm
Holzdicke 22-30;	25 mm	750-1000mm
Holzdicke: 35-40;	30 mm	1000-1250mm
Holzdicke: 45-60mm;	35 mm	1250-1500mm
Holzdicke: 65-80mm;	40mm	1500mm
Holzdicke: 100 mm;	45 mm	1500mm

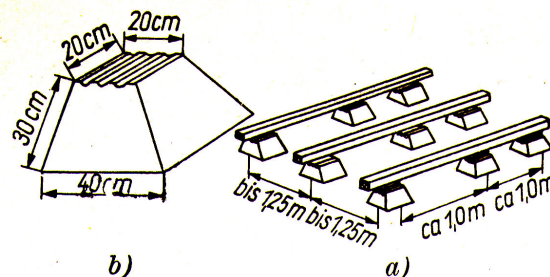


Abbildung 31 Stapelunterlage

- Die Stapellatten sollten am Rand leicht überstehen (Schutz vor Sonne)
- Teilweise werden leicht geneigte Dächer verwendet, um das Holz oben vor Regen zu schützen
- Die Dauer beträgt je nach Holzart und Dicke zwischen 1-4 Jahren
Richtwerte: Dichte unter 500kg/m³ 0,6 Jahre/cm; über 500kg/m³ 1 Jahr pro cm Holzdicke
- auf freien Luftdurchzug achten

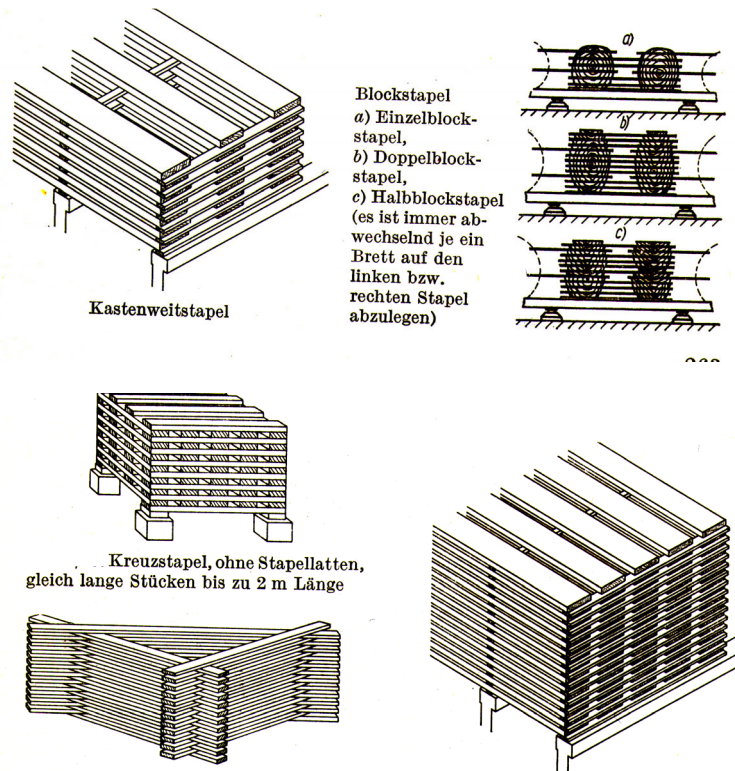


Abbildung 32 Möglichkeiten der Stapelbildung

2.2.3.3. Verdunstungstrocknung

Dabei erfolgt der Feuchtigkeitsentzug in einem Dampf-Luftgemisch mit variabler Zusammensetzung (Luftfeuchte, Temperatur) bei Temperaturen unter 100°C. Die Luftgeschwindigkeit beträgt mindestens 2m/s. Das Trocknungsmittel dient einmal als Wärmeträger, in dem es Wärme von den Heizflächen aufnimmt und an die Holzoberfläche abgibt zum anderen als Transportmittel für das vom Holz abgegebene Wasser. Als Folge dessen sinkt die Temperatur des Strömungsmediums und steigt die relative Luftfeuchte. In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und der Holzfeuchte entstehen Temperaturunterschiede von 2-10K zwischen der zu- und Abströmseite des Trocknungsmittels. Die Temperaturdifferenz ist beim Trocknungsbeginn am grössten (Verdunstung des gebundenen Wassers), am Ende (Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte) am geringsten. Bei Erreichen der Fasersättigung sinkt die Differenz deutlich ab. Abbildung 33 zeigt einen solchen Trockner.

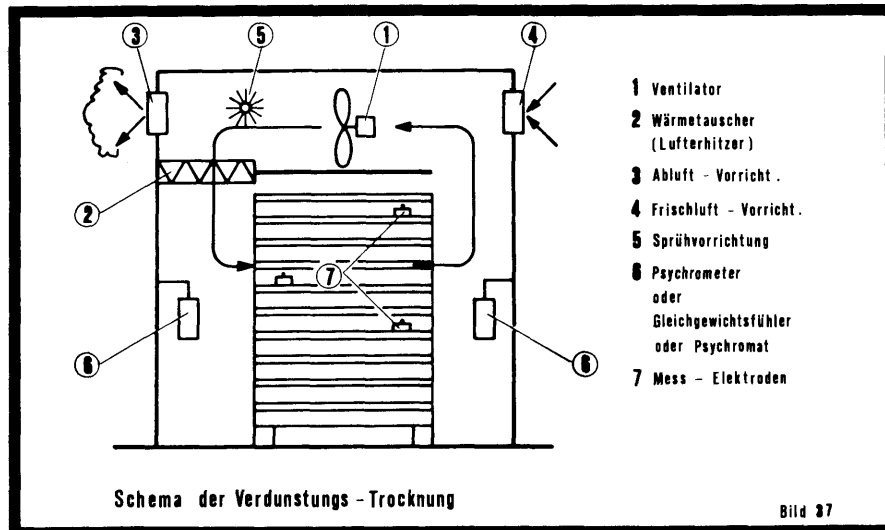


Abbildung 33 Verdunstungstrockner

2.2.3.4. Verdampfungstrockner (Hochtemperaturtrocknung)

Bei diesem Verfahren erfolgt die Trocknung bei Temperaturen über 100°C. Die Trocknung wird wesentlich beschleunigt da,

- Hohe innere Dampfdrücke entstehen
- Das Holz eine niedrigere Gleichgewichtsfeuchte anstrebt
- Der E-Modul des Holzes deutlich sinkt (bei Temperaturen über 103°C sinkt die Proportionalitätsgrenze deutlich ab)

So werden beispielsweise bei Erhöhung der Trocknungstemperatur von 80 auf 118°C folgende Verhältnisse der Trocknungszeiten angegeben:

Verdunstungstrocknung 80°C	:	Verdampfungstrocknung 118°C
4	:	1 (Nadelholz)
3..2	:	1 (Laubholz)

Heute wird in Südamerika und Australien Radiata bei Temperaturen um 150°C getrocknet.

Bei unsachgemässer Trocknung kann es bei diesem Verfahren zu starker Rissbildung und auch zu Verfärbungen an der Oberfläche kommen. Dies kommt insbesondere bei Laubhölzern oberhalb der Fasersättigung vor.



Abbildung 34 Hochtemperaturtrockner (Vanicek)

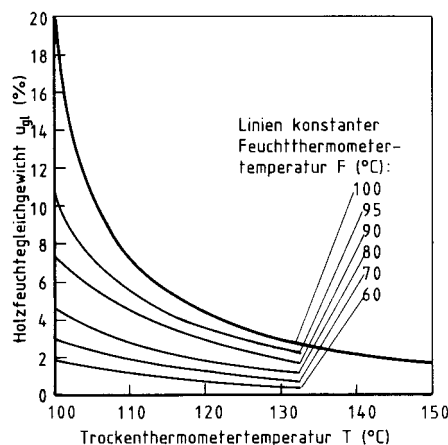


Abbildung 35 Einfluss der Temperatur auf die Gleichgewichtsfeuchte

2.2.3.5. Vakuumtrocknung

Das Prinzip beruht darauf, dass der Siedepunkt des Wassers bei Reduzierung des Luftdruckes sinkt.

Man unterscheidet in

- diskontinuierliche Verfahren: dabei erfolgt die Erwärmung durch Konvektion bei atmosphärischem Druck in der Trockenkammer, bei Erreichen der gewünschten Temperatur wird das Vakuum angelegt (Sollwert ca. 100mbar). Dadurch erfolgt eine Abkühlung durch Verdampfung des Wassers. Nach einer gewissen Zeit muss erneut geflutet werden, um eine Erwärmung zu erreichen. Danach wird wieder Vakuum angelegt. Die Trocknungsdauer kann um 20% (dickes Brett) bis 50% (dünnes Brett) reduziert werden. Die Trocknung der Kammer erfolgt durch Kondensation an Kühlkörpern (nur noch wenig angewandt).
- kontinuierliche Verfahren: dabei wird a.) in der Vakuumphase Heissluft oder Heissdampf unter Einbehaltung eines Teilvakuums eingelassen, b) das Holz über Heizplatten erwärmt oder c) die Erwärmung erfolgt durch Mikrowellen

- Eine Spezialvariante ist die Vakuumpresstrocknung. Dabei wird eine flexible Abdeckung über das Holz gelegt. Durch den atmosphärischen Aussendruck wirkt eine äussere Kraft bei Anlegen des Vakuums auf das Holz, Verformungen werden verhindert.

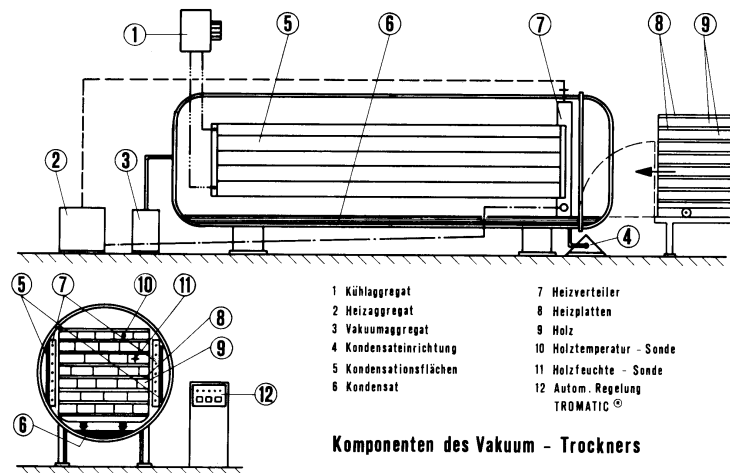


Abbildung 36 Vakuumpresstrockner (Bollmann)

Das aus dem Holz entfernte Wasser verringert das Vakuum im Behälter. Zum Abführen des Kondensates kann manuell (Aufheben des Vakuums) oder automatisch bei Beibehaltung des Vakuums erfolgen.

2.2.3.6. Sonstige Trocknungsverfahren

Ferner sind folgende Verfahren im Einsatz:

- Die Hochfrequenz Trocknung:
Trocknung des Holzes in einem hochfrequenten Wechselfeld. Es kommt zum Umpolen der Wassermoleküle und dadurch zur Erwärmung. Die Hochfrequenz Trocknung ermöglicht eine kurze Trocknungszeit. Von 2-4 h bei Holz dicken bis 150 mm. Das Verfahren wird relativ wenig und für spezifische Produkte verwendet (kurze Sortimente, geschweifte Teile, geeignet für Holzarten mit niedrigem Diffusionswiderstand).
- Presstrocknung:
Dabei wird das Holz zwischen den Platten einer Mehretagenpresse getrocknet.
- Trocknung in heissen Ölen:
Das Holz wird dabei in einem Ölbad auf 105-130°C erhitzt. Das verdampfte Wasser steigt als Gasblase im Ölbad nach oben. Dabei bildet sich an der Oberfläche eine mehrere cm dicke Schaumschicht. Das Verfahren wird gleichzeitig zum Imprägnieren verwendet (Öl-Hitzebehandlung).
Das Verfahren ist relativ schnell. Es ergibt sich beispielsweise für ein 50mm dickes Brett folgendes Verhältnis der Trocknungszeiten

Verdunstungstrocknung	75 h	6
Verdampfungstrocknung	17 h	1,42
Öl-Hitzebehandlung	12 h	1

2.3. Dämpfen

2.3.1. Zweck

Mit dem Dämpfen des Holzes werden folgende Ziele angestrebt:

- 1.) Plastifizierung des Holzes zur Verbesserung der weiteren Verarbeitung (z.B. zum Biegen oder für die Furnierherstellung)
- 2.) Abtöten von Schädlingen
- 3.) Abbau von inneren Spannungen (zu Beginn der technischen Trocknung)
- 4.) Farbveränderungen

2.3.2. Ablauf

Es gibt zwei unterschiedliche Dämpfverfahren (vgl. Abbildung 37), nämlich das direkte (Dampf wird unmittelbar in Kammer eingeleitet; eher für Massenware) und das indirekte Verfahren (Erwärmung erfolgt via ein Wasserbad über welchem das Holz gestapelt wird; eher für Edelholz in Gebrauch).

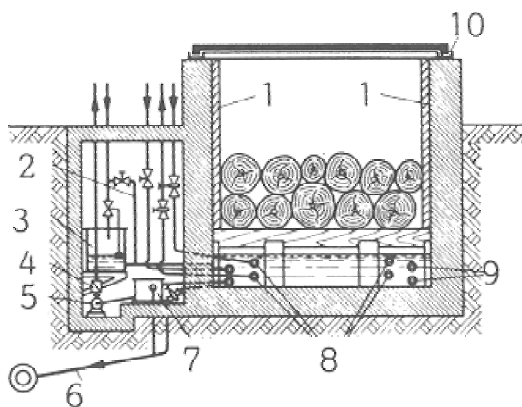


Abbildung 76 Dämpfgrube für indirekte Beheizung (nach Doffiné⁴⁴) 1 Schutzbohlen 2 Fülleitung 3 Kaltwasserbehälter 4 Rückschlagventil 5 Kondensat-Rückspießpumpe 6 Schmutzwasser 7 Kondensat-Sammelbehälter 8 Heißwasserschlangen 9 Abdampfschlangen 10 Wasserverschluß

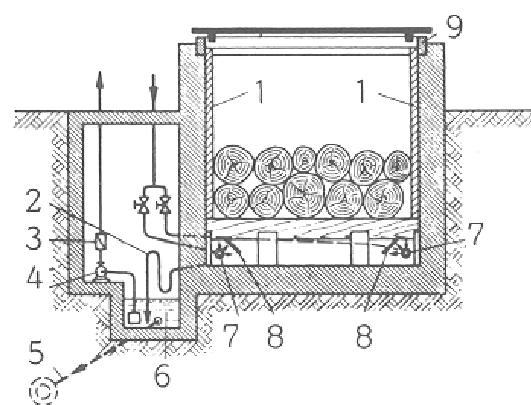


Abbildung 77 Dämpfgrube für direkte Beheizung (nach Doffiné⁴⁴) 1 Schutzbohlen 2 Syphonverschluß 3 Rückschlagventil 4 Schmutzwasserpumpe 5 falls möglich, direkter Anschluß 6 Schmutzwasser 7 Abdampf 8 Prallbleche 9 Randhölzer

Abbildung 37 Indirektes Dämpfverfahren (links) und direktes Dämpfverfahren (rechts)

Tabelle 10 Vor- und Nachteile der beiden Dämpfverfahren; aus Gfeller (2000)

	Direkt	Indirekt
Vorteile	Einfache Anordnung der Rohrleitungen	Besonders milde Holzbehandlung → geringe Schäden
	Ausnutzbarkeit von Abdampf mit geringstem Druck	Kondensatrückgewinnung möglich → gute Wirtschaftlichkeit
	Regelung schneller wirksam	Dampf braucht nicht ölfrei zu sein
		Anschluss an Hochdruck-Heisswasseranlage möglich → zusätzliche Wirtschaftlichkeit
	Schadstoffkonzentration des Abwassers gering	Abwassermenge klein
Nachteile	Sorgfältige Überwachung nötig → Gefahr von Schäden	Höherer Dampfdruck notwendig
	Kondensatrückgewinnung nicht möglich → Wärmewirtschaftlich ungünstig	Rohrleitungen umfangreicher → teurere Anlage
	Dampf muss völlig ölfrei sein → ist schwierig zu bewerkstelligen	Träge Regelung
	Abwassermenge gross	Schadstoffkonzentration des Abwassers hoch

2.3.3. Dampfverbrauch

Dieser ist von vielen Faktoren abhängig, aber folgende Richtwerte können angesetzt werden:

Direkte Dämpfung 10 - 15 kg/h und umbautem m³

Indirekte Dämpfung 7 - 11 kg/h und umbautem m³

Für Rund- und Schnittholz kann mit 15 - 25 kg/h m³ gerechnet werden, für Biegeteile kann sich dieser Wert bis auf 100 kg/h m³ erhöhen.

2.3.4. Dämpfzeiten

Diese sind hauptsächlich abhängig von der Rohdichte des Holzes, sowie dem Durchmesser des Abschnittes. Eine Wasserlagerung vor dem Dämpfen verkürzt die Dämpfzeit bis zur Hälfte; sind Farbänderungen erwünscht, so ist häufig mit der 1,5 - 2fachen Dämpfzeit zu rechnen. Als Faustregel kann aber gelten (aus Lohmann (1999), nach Fleischer, O.H. in Vorreiter (1958)):

Bei $\rho_0 = 0.5$ $t = 1/2 D^2$ mit $\rho_0 =$ Rohdichte und $D^2 =$ Durchmesser
 Bei $\rho_0 = 0.64$ $t = 2/3 D^2$ in dm, t in Stunden

Tabelle 11: Dämpfzeiten

Holzart	Dämpfen Messerbetrieb		Schälbetrieb		Kochen	
	h	°C	h	°C	h	°C
Abachi	36...48	90...95	36...48	90...95	-	-
Ahorn (schlicht)	-	kalt	-	kalt	-	kalt
Ahorn Knollen	-	-	-	-	72	85
Birke	-	-	-	-	24	75...78
Buche, Rot-	35...40	75...80	48	75...80	-	-
Birnbaum	-	-	-	-	90...100	80
Erle	-	-	48	90...95	-	-
Ilomba	15...20	75...80	24	75...80	-	-
Kirschbaum	30...36	75...80	30...36	75...80	-	-
Limba	48	80...85	60	80...85	-	-
Nußbaum	48	75	48	75	-	-
Nußbaum, Pyramiden-	-	-	-	-	72	80
Okoumé	12	80	18	80	-	-
Pappel	-	kalt	-	kalt	-	kalt
Samba	12...15	75	12...15	75	-	-
Tiama	72	90...95	96	90...95	-	-

2.3.5. Kochen

Das Kochen des Holzes, wobei das Holz ganz im Wasser untergetaucht wird (Wassertemperatur ca. 85°C), bewirkt das selbe wie das Dämpfen. Problematisch ist hier aber das Aufschwimmen der Hölzer, sowie die Frage der Abwasserbeseitigung, da viel mehr Abwasser anfällt als beim Dämpfen. Bei der Heisswasser-, als auch der Dampfbehandlung werden nämlich wasserlösliche Inhaltsstoffe (z.B. Zucker, Stärke, Phenole), bzw. Hydrolyseprodukte (z.B. Essigsäure) aus dem Holz herausgelöst, welche das Abwasser belasten.

2.4. Kleben

2.4.1. Allgemeines

Klebstoffe sind Materialien, die es gestatten, Werkstoffe ohne mechanische Verbindungsmittel wie Nägel, Bolzen usw. fest miteinander zu verbinden. Unter einem Klebstoff versteht man einen nichtmetallischen Werkstoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) und seine innere Festigkeit (Kohäsion) Verbinden kann, ohne dass das Gefüge der zu verbindenden Teile wesentlich verändert wird.

Der Begriff Klebstoff schliesst andere gebräuchliche Bezeichnungen wie Leim, Kleister, Kleblack, Klebkitt, Warmleim, Dispersionskleber etc. mit ein (Autorenkollektiv 1975).

Ein Klebstoff besteht im allgemeinen aus Bindemittel (Filmbildner, Grundstoff), das in einem Lösungsmittel dispergiert oder gelöst ist, sowie anderen Füllstoffen und Streckmitteln.

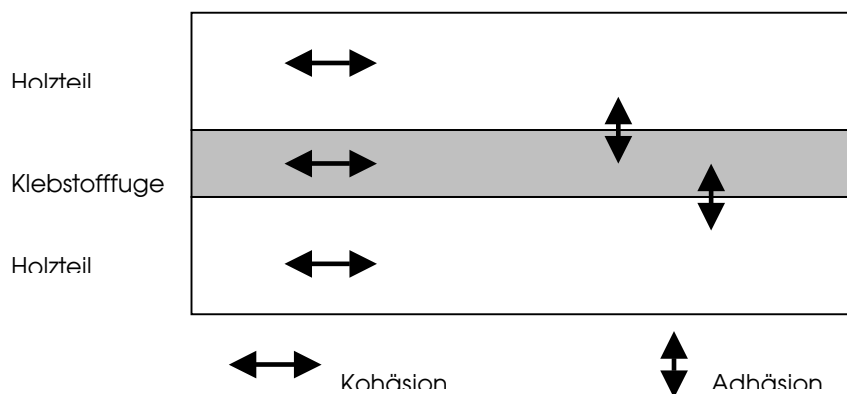


Abbildung 38 Kohäsion und Adhäsion

Der Klebstoff setzt sich zusammen aus:

Den nicht flüchtigen Bestandteilen

- Klebgrundstoff (Filmbildner, bestimmt die Grundeigenschaften des Klebstoffes)
- Modifizierungsmittel (Zusatz zum Klebgrundstoff zur Verbesserung der mechanisch-physikalischen Eigenschaften, der thermischen Eigenschaften und des Feststoffgehaltes)
- Füllstoffe/Streckmittel (Erhöhung des Feststoffgehaltes des Klebstoffes, Verbesserung der Fugenbeständigkeit)
- Hilfsstoffe (Beschleuniger, Härter, Verzögerer)
- Spezifische Zusatzstoffe (Farbstoffe, Tixotropierungsmittel)

Den flüchtigen Bestandteilen

- Lösungsmittel
- Dispersionsmittel
- Verdünnungsmittel

Übliche Bezeichnungen für Klebstoffe:

Leim

In Wasser gelöster Klebstoff. Die Basis kann natürlich oder synthetisch sein.

Kleister

Wässriges Quellungsprodukt, das schon in geringer Feststoffkonzentration eine schmalartige, kurzabreissende, nicht fadenziehende Masse bildet.

Klebdispersion

Der Klebstoff ist in einem Dispergierungsmittel (Wasser, organisches Lösungsmittel) fein verteilt. Das Lösungsmittel bildet die kohärente, zusammenhängende Phase. Mit dem Dispersionsmittel kann der Klebstoff in weiten Grenzen verdünnt werden.

Kleblack (Lösungsmittelkleber)

Lösung des Klebstoffes in flüchtigen, organischen Lösungsmitteln.

Schmelzkleber

Bei Raumtemperatur fester Klebstoff, der für die Verarbeitung aufgeschmolzen wird. Es sind thermoplastisch als auch chemisch härtende Typen bekannt.

Klebfolie

Der Klebstoff ist auf einem Träger (meist hochsaugfähiges Papier) aufgetragen, das Lösungsmittel wird durch kurzes Aufwärmen verflüchtigt. Der Klebstoff härtet durch Hitze oder Druck aus, wenn die Klebfolie zwischen die zu verklebenden Flächen gelegt wird.

Pulverleim

Verschiedene Klebstoffe können als Pulver lange gelagert werden. Auf Grund des Fehlens von Lösungsmitteln, tritt keine chemische Reaktion zwischen den Molekülen auf. Erst nach Zuführung des Lösungsmittels wird ein Klebstoff mit den bekannten Eigenschaften erreicht.

2.4.2. Einteilung der Klebstoffe

Folgende Einteilung von Klebstoffen ist üblich:

Klebstoffe aus Naturstoffen:

Klebstoffe auf Basis von *Eiweiss*:

- Glutin
- Blutalbumin
- Kasein

Klebstoffe auf Basis von *Polysacchariden*:

- Dextrin
- Nitrocellulose
- Karboxymethylcellulose

Synthetische Klebstoffe (chemische Klebstoffe):

Klebstoffe auf Basis *duroplastisch härtender Harze*

- Harnstoff-Formaldehyd-Harze (UF)
- Melamin-Formaldehyd-Harze (MF)
- Phenol-Formaldehyd-Harze (PF)
- Kresol-Xylenol-Formaldehyd-Harze
- Resorcin-Formaldehyd-Harze (RF)
- Ungesättigte Polyester-Harze
- Polurethane (PUR, PMDJ)
- Mischharze (Harnstoff mit Melamin verschnitten u.a.; z.B. MUPF, PMF, PMUF, Zugabe von Taninnen, Lignin, Isocyanat)

Klebstoffe auf Basis von *thermoplastischen Harzen und Kautschuk*

- Polyvinylacetat (PVA)
- Polyvinylchlorid und Mischharze
- Chloropren und Kautschuk

2.4.3. Klebevorgang

Die Verklebung zweier Körper erfolgt mit Hilfe eines Klebstoffes, der sich während der Abbindezeit verfestigt und dadurch die beiden Flächen kraftschlüssig miteinander verbindet.

Alle bekannten Klebstoffe sind makromolekular oder enthalten zumindest einen Anteil höhermolekularer Verbindungen.

Bei einigen Klebstoffen wird während des Klebevorganges aus niedermolekularen Verbindungen durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition ein hochmolekularer Klebstoff erzeugt.

Anforderungen an einen Klebstoff:

Er muss eine Verbindung mit ausreichender Zug- und Scherfestigkeit sowie Klima- und Chemikalienbeständigkeit ergeben

- Er soll leicht und schnell auftragbar sein und die zu verbindenden Flächen rasch benetzen
- Er soll möglichst arm an quellenden (Wasser) oder destruktiven Reaktionen sein (saure Reaktion)
- Der Übergang des Klebstoffes beim Abbinden soll kontrollierbar sein und in kurzer Zeit erfolgen
- Die Klebfuge darf nicht verhungern, d.h. der Klebstoff darf nicht zu stark in das Holz eindringen

Folgende Klebstoffverarbeitungen sind möglich:

Schmelzverfahren

Der Klebstoff wird im geschmolzenen Zustand auf die zu verbindende Oberfläche aufgetragen. Dieser erstarrt entsprechend der Abkühlung in der Klebfuge zu einer zähen, harten Schicht. Sondervariante: Der Klebstoff wird in Form einer dünnen Folie zwischen die Flächen gelegt und anschließend durch Temperatur eingeschmolzen.

Verklebung mit Lösungsmittelklebern

Der Klebstoff wird im gelösten Zustand oder als Dispersion aufgetragen. Der Klebstoff-Film bildet sich durch Verdunsten, Diffusion oder Absaugen des Lösungsmittels durch das Kapillarsystem des Holzes. Dabei steigt die Viskosität des Klebstoffes stark an, er geht vom Sol- zum Gelzustand über. Die Endfestigkeit wird erst nach dem vollständigen Abwandern des Lösungsmittels erreicht.

Tabelle 11 zeigt wichtige Begriffe und die Beanspruchungsgruppen von Holz, Tabelle 12 wichtige Klebstoffe der Holzindustrie und deren Einteilung.

Tabelle 11 Begriffe und Verklebungsklassen von Holz

Klebstofftechnische Begriffe		
Klebstoff	Nichtmetallischer Werkstoff, mit dem andere Werkstoffe durch Adhäsion und Kohäsion fest miteinander verbunden werden. Klebstoff ist der Oberbegriff für Leime und Kleber.	
Füllmittel	Feingemahlene Stoffe ohne eigene Klebekraft (Kreide, Gesteins- und Holzmehl usw.)	
Streckmittel	Quellfähige organische Stoffe mit eigener Klebekraft (Getreidemehl, Stärke usw.) Zweck: Leimkosten senken, Viskosität der Leimflotte regeln, Füllkraft erhöhen, Leimdurchschlag vermindern, Fugeneigenschaften verbessern.	
Reifezeit	Zeit vom Ansetzen eines Klebstoffes bis zum verarbeitungsfähigen Zustand	
Gebrauchsdauer (auch Topfzeit)	Zeit vom verarbeitungsfähigen Zustand bis zum Beginn des Abbindens im Gefäß	
Wartezeit:	offen	Zeit vom Auftragen des Klebstoffes bis zum Zusammenlegen der Teile
	geschlossen	Zeit nach dem Zusammenlegen bis zum Erreichen des vollen Pressdruckes
Abbindezeit	Zeit bis Fugenfestigkeit erreicht wird und der Pressdruck aufgehoben werden kann	
Abbindetemperatur	Temperatur während der Abbinde- bzw. Aushärtezeit – Kaltverleimung 5 bis 25 °C – Heißverleimung über 90 °C – Warmverleimung 40 bis 70 °C	
Pressdruck	Druck auf die Klebefuge während der Abbindezeit	
Presszeit	Zeit zwischen Beginn und Ende des vollen Pressdruckes	
Adhäsion	Anhangskräfte zwischen den Molekülen verschiedener Stoffe; z.B. Kräfte zwischen Klebstoff und Holzwerkstoff bzw. Füge teil	
Kohäsion	Zusammenhangskräfte zwischen den Molekülen gleicher Art; z.B. Kräfte innerhalb einer Klebstoffschicht	
Dispersion	Verteilungszustand eines fein verteilten, unlöslichen Stoffes in einer Flüssigkeit	
Fugendicke	Dünne Leimfuge maximal 0,1 mm Dicke Leimfuge über 0,1 mm	
Härter	Säuren bzw. Salze, die die unterbrochene Kondensation einleiten	
Untermischverfahren	Beim Leimansetzen wird Leim und Härter gemischt	
Vorstrichverfahren	getrennter Auftrag von Leim und Härter auf je eine Fugenseite	
Beanspruchungsgruppen (DIN EN 204)		
Beanspruchungsgruppe	Klimabedingungen und Anwendungsbereiche	
D1	Innenbereich, wobei die Temperatur nur gelegentlich und kurzzeitig mehr als 50 °C und die Holzfeuchte maximal 15% beträgt	
D2	Innenbereich mit gelegentlicher kurzzeitiger Einwirkung von abfließendem Wasser oder Kondenswasser und/oder kurzzeitiger hoher Luftfeuchte mit einem Anstieg der Holzfeuchte bis maximal 18%	
D3	Innenbereich mit häufiger kurzzeitiger Einwirkung von abfließendem Wasser oder Kondenswasser und/oder eine langzeitige Einwirkung hoher Luftfeuchte. Außenbereich, vor der Witterung geschützt	
D4	Innenbereich mit häufig starker Einwirkung von abfließendem Wasser oder Kondenswasser; Außenbereich, der Witterung ausgesetzt, jedoch mit angemessenem Oberflächenschutz	

2.4.4. Klebetheorien

Die Ausbildung einer festen Verbindung durch den Klebstoff wird durch eine Reihe wichtiger Einflussfaktoren entscheidend beeinflusst. Der Anwender muss diese Größen kennen, um einen optimalen Effekt einstellen zu können. Die Gesamtfestigkeit der Klebfuge wird durch Adhäsion und Kohäsion bestimmt (vgl. Abbildung 38).

Der Bruch tritt also im Holz und nicht in der Klebfuge ein, denn als Bedingung gilt:

1.) Kohäsion_{Fügeteil} < Kohäsion_{Klebstofffuge}

2.) Adhäsion_{Klebstofffuge} > Kohäsion_{Fügeteil}

Adhäsion ist die Summe aller Kräfte, welche die Haftung des Klebstoffes an der Oberfläche bewirken.

Kohäsion ist die Summe aller Kräfte, die den Zusammenhalt eines Stoffes bewirken (also der Klebfuge oder des Holzes).

Tabelle 12 Abbindevorgänge und gebräuchliche Klebstoffe und Zuordnung zu Klebstoffklassen

Abbinde- bzw. Härtevorgänge			
Klebstoffart	physikalisch		chemisch
Dispersions-Klebstoffe	Abwandern von Wasser und Zusammenlagern der Klebstoffteilchen, Aufbau von Kohäsions- und Adhäsionskräften, zusätzliche mechanische Verankerung		
Kondensations-Klebstoffe	Wie oben		Chemische Reaktion durch Zugabe von Härter und/oder Hitze, Vernetzung
Kontakt-Klebstoffe lösungsmittelhaltig	Verdunsten der Lösungsmittel, Zusammenlagern der Klebstoffmoleküle, nach Ablüften pressen – Adhäsionskräfte zwischen den Oberflächenmolekülen		Mit Härter teilweise Vernetzung
Zweikomponenten-Klebstoffe lösungsmittelfrei			Chemische Reaktion zwischen den beiden Komponenten
Schmelz-Klebstoffe	Sofortige Verfestigung nach Unterschreiten der Schmelztemperatur		Bei reaktiven Schmelzklebern zusätzliche Vernetzung

Gebräuchliche Klebstoffe in der Holztechnik					
Klebstoffe			Gruppe nach EN 204	Temperaturbeständigkeit (°C)	Anwendung
Dispersions-Klebstoffe	1	Polyvinylacetat PVAC	D2/D3	- 20 bis 100	Montage-, Flächen- und Lackleime
	2	Polyvinylacetat PVAC Zwei-Komp.	D4	- 20 bis 120	Wasserfeste und wetterbeständige Verleimungen
Kondensations-Klebstoffe	3	Harnstoffharz (gefüllt)	D2/D3	- 20 bis 150	Furnier- und Flächenverleimungen
	4	Harnstoff-Melaminharz	D3		Furnierleime
	5	Phenol-/Resorcinharz	D3/D4		Wasser- und wetterbeständige Verleimungen
Kontakt-Klebstoffe	6	ohne Härter	keine Klassifizierung	- 20 bis 70	Verklebungen von verschiedenen Werkstoffen
	7	mit Härter		- 20 bis 100	wie 6, aber bessere Wärme- und Feuchtigkeitsbeständigkeit
Reaktions-Klebstoffe	8	Epoxidharzkleber	D3/D4	- 20 bis 100	Sonderverklebungen
	9	Polyurethan-Kleber PUR-Kleber			Verleimungen mit hoher Wasser- und Temperaturbeständigkeit
Schmelz-Klebstoffe	10	Ethylenvinylacetat EVA	keine Klassifizierung	- 10 bis 60	Verkleben und Vorschichten verschiedener Kantenmaterialien
	11	Polyamid		- 20 bis 130	
	12	Polyolefin			
	13	PUR		< 150	

2.4.4.1. Van der Waalsche Kräfte

Sie sind Restvalenzkräfte, die zwischen allen chemischen Verbindungen wirksam sind. Sie sind die Ursache dafür, dass auch unpolare Stoffe wie Paraffin einen Zusammenhalt zeigen. Es gibt 3 Arten von Restvalenzbindungen:

- Polkräfte (Debye-Kräfte); treten zwischen Molekülen mit permanenten Dipolen auf, es wirken elektrostatische Kräfte. Die Wechselwirkung der Dipole erzeugt Anziehungskräfte, die von dem Produkt der Stärke beider Dipole und der 6. Potenz des Abstandes abhängen;

Beispiele: H-O Gruppen bei PVA, Polyester, Polykondensationsklebstoffe
 N-H Gruppen bei Harnstoffharzen, Melaminharzen
 C=N=O Gruppen bei Isocyanaten, PUR Klebstoffen

- Induktionskräfte (Keesom-Kräfte); im leichtpolymerisierbaren Molekül kann bei Annäherung eines starken Dipols ein sekundärer Dipol induziert werden;
Beispiele für Gruppen: -C=C- ungesättigte Polyester
 C=C=NH Melaminharze
 C=C-C=O Akrylatharze
Induktionskräfte haben eine Reichweite von 5×10^{-8} cm.
- Dispersionskräfte (London- Kräfte); treten zwischen allen Atomen und Molekülen auf. Die Reichweite liegt bei 5×10^{-8} cm. Die Energie nimmt mit der Entfernung mit der 6. Potenz ab.
Bei unpolaren Stoffen bilden diese Kräfte 75 - 100% aller Adhäsions- und Kohäsionskräfte.

2.4.4.2. Wasserstoff-Brückenbindungen

Eine häufig auftretende Bindungsart höherer Bindungsenergie (3..9 kcal/Bindung, Reichweite $2,6..3 \times 10^{-8}$ cm) sind Wasserstoffbrückenbindungen. Sie sind an das Vorhandensein von Wasserstoffatomen und an das Auftreten von Elektronenpaaren gebunden. Nähert sich ein Wasserstoffatom dem negativen Pol eines Dipols, so treten erhebliche Kräfte auf, die durch den kleinen Radius des H-Atoms begünstigt werden. Die Bindung bildet sich nur im atomaren Bereich aus. Die Bindung tritt z.B. bei der Verklebung von Holz mit Harnstoffharzen oder Phenolharzen auf.

2.4.4.3. Chemische Bindungen

Man formuliert 2 Grundtypen von Verbindungen:

- Die Ionenbeziehung (heteropolare Bindung), Phenolharzleime
- Die Atombindung (homöopolare Bindung)

Sie kommen dadurch zustande, dass zwischen den reagierenden Atomen Elektronen ausgetauscht werden und dadurch eine feste Bindung entsteht. Chemische Bindungen haben wesentlich höhere Festigkeiten. Sie können zwischen den Klebstoffen und den Cellulose- bzw. Hemicellulosebestandteilen des Holzes ausgebildet werden.

2.4.4.4. Vergleich der Bindungsarten

Tabelle 13 zeigt einen Vergleich der Bindungsarten. Chemische Bindungen haben extrem grosse Bindekräfte.

Tabelle 13 Vergleich der Bindungsarten

Bindung	Dissoziationsenergie in kJ	Mittlere Reichweite in 10^{-8} cm
Chem. Bindung	335....420	4...5
Wasserstoffbrückenbindung	21	2,6...3
Dispersionskräfte	8,4	3,5..4,5
Polkräfte	8,4	4..5
Induktionskräfte	8,4	3,5..4,5

2.4.5. Einfluss des Holzes auf die Verklebungsgüte

Wichtige Einflussfaktoren des Holzes sind:

- Die **Holzfeuchte** bei der Verklebung (abhängig von Klebstoffart, PUR Klebstoffe sind unempfindlicher gegen Feuchteschwankungen als Harnstoff- und Phenolharze). Holz wird allgemein bei 12-18% Feuchte verklebt. Soll die Verbindung für höhere Gebrauchsfeuchten eingesetzt werden, sind Klebstoffe zu wählen, die das Quell-/Schwindverhalten kompensieren.
- Die **Dichte des Holzes**, beeinflusst die Scherfestigkeit, die Scherfestigkeit steigt bis $0,8\text{g/cm}^3$ an und fällt danach ab. Dies korreliert mit dem Anteil an Holzbruch.
- Die **Faserrichtung**. Klebverbindungen, deren Fasern parallel zur Klebfuge verlaufen haben die höchste Scherfestigkeit; mit zunehmendem Winkel fällt die Festigkeit, sie erreicht bei 90 Grad (Sperrholz) den niedrigsten Wert.
- **Holzart**

Die Klebbarkeit der einzelnen Holzarten variiert stark. Laubhölzer hoher Dichte lassen sich schwerer kleben als Nadelhölzer. Holz mit starken Inhaltstoffen zeigt eine Abhängigkeit vom Gehalt an Inhaltstoffen.

2.4.6. Klebgrundoperationen

Folgende prinzipielle Vorgehensweise erfolgt beim Kleben:

Gestaltung der Klebfuge

Die Klebfuge soll so gestaltet werden, dass vorwiegend Scherkräfte auftreten, aber keine schälende Wirkung vorliegt, günstig sind Schäftungen und Überlappungen.

Holzfeuchte

Diese sollte etwa 8-12 % sein. Ist das Holz zu trocken (unter 5%) kommt es zum Wegschlagen des Wassers aus dem Klebstoff, dadurch verringert sich das Fließvermögen; ist es zu feucht vermindert sich die Benetzbarkeit des Holzes, das Wasseraufnahmevermögen des Holzes sinkt. Dadurch steigt die Verleimungszeit. Eine Ausnahme bilden PUR Leime, die auch nass verklebt werden können.

Oberflächenvorbereitung

Bei Holz erfolgt vor der Verklebung meist ein spanender Abtrag, um eine saubere, glatte Oberfläche zu erzielen.

Dies sollte unmittelbar vor der Verleimung erfolgen. So kommt es bei Keilzinken auch zu Verformungen (durch Quellen und Schwinden) wenn zwischen Vorbehandlung und Verklebung zu viel Zeit liegt.

Vorbereitung des Klebstoffes

Vor der Verarbeitung erfolgt ein Mischen der Klebstoffkomponenten. Zugegeben werden Streckmittel (Weizenmehl, Roggenmehl, Bohnenmehl), um den

Klebstoffverbrauch zu reduzieren. Die Streckmittelzugabe erhöht die offene und die geschlossene Wartezeit. Bei Tischlerplatten werden bis zu 250% Streckmittel zugegeben. Ebenso werden Füllstoffe (Kaolin, Glimmer etc.) zugegeben, um die Warm- und Kochwasserbeständigkeit zu erhöhen. Durch Mikroverkapselung werden hochreaktive Härter, Beschleuniger und Modifizierungsmittel in innerte Feststoffe überführt. Der diesen Komponenten zugeführte Klebstoff verhält sich wie ein Einkomponentenklebstoff, der z.B. erst bei Einwirkung von Druck und Wärme härtet.

Klebstoffauftrag

Der Klebstoffauftrag erfolgt durch Giessen, Streichen, Spritzen.

Folgende Auftragsmengen gelten (Richtwerte) (Zeppenfeld 1991):

Absperren, Auftrag auf Mittellage	150-240g/m ²
Absperren, Auftrag auf Furnier	140-240g/m ²
Kleben sägerauher Flächen	400-500g/m ²
Kleben von Folien auf Spanplatten	80-150g/m ²
Kleben von Dekorfolien auf harte Faserplatten	30-80g/m ²
Kleben von Schmalflächenband auf Spanplatten	140-170g/m ²
Brettschichtholz	300-400g/m ²

Fügeteil zusammenführen/offene Wartezeit

Die offene Wartezeit ist die Zeit, die der Klebstoff nach dem Auftrag bis zum Fügen der Teile ohne äussere Einwirkung sich selbst überlassen ist. Dabei treten im Klebstoff Veränderungen auf, die durch das Absaugen von Lösungsmitteln in das Holz und das Verdunsten in die Umgebung verursacht sind.

Die Zeit ist abhängig von:

- Der chem. Zusammensetzung des Klebstoffes
- Der Klebstoffauftragsmenge
- Der Saugfähigkeit des Klebstoffes
- Der Feuchte des Fügeteiles
- Äusseren Bedingungen (Luftströmung, Licht- und Strahlungseinwirkung)

2.4.7. Beschreibung ausgewählter Klebstoffe

2.4.7.1. Klebstoffe auf Basis natürlicher Ausgangsmaterialien

Glutinleime

Es sind die ältesten Klebstoffe. Die Herstellung erfolgt aus Abfallprodukten auf der Basis von Eiweissen wie Leder, Knochen, Fischblasen. Die Klebfuge hat eine gute Bindefestigkeit und Elastizität aber eine geringe Feuchtebeständigkeit.

Bei der Verarbeitung werden die Glutinleime mit Wasser gequollen und durch Erwärmen in Lösung gebracht. Die Holzoberfläche wird vorgewärmt.

Blutalbumine

Holztechnologie I

Diese haben eine wichtige Rolle bei der Sperrholzherstellung gespielt. Der Klebstoff wird aus geronnenem Blut hergestellt. Der Klebstoff wird nach Quellen in kaltem Wasser löslich. Er wird im Verhältnis 1:3 bis 1:10 in Wasser gelöst.

Kaseinleime

Dieser wird aus dem Eiweiss von Milch gewonnen. Es bildet mit Wasser und Alkali einen Kaltleim.

Dextrine

Durch thermischen Abbau oder Hydrolyse wird die makromolekulare Stärke in kolloidlösliche Dextrine umgewandelt. Der DP (durchschnittlicher Polymerisationsgrad) beträgt etwa 200.

Sie werden meist als wässrige Kleber verwendet.

Karboxymethylcellulose

Wird durch Umsetzen von Cellulose mit Natrium-Chlorazetat hergestellt. Es entstehen verschiedene Karboxymethylcellulosen.

Die Haftung auf polaren Materialien ist gut, das Material ist empfindlich gegenüber Feuchte.

Holzeigene Bindekräfte

Oligomere Zucker, wie sie bei der Hydrolyse von Hemicellulose und ggf. auch von Cellulose entstehen, sind unter Einfluss von Wärme und in Gegenwart von Feuchte sinterbar und schmelzbar. Sie sind in der Lage z.B. Fasern oder Partikel in Gegenwart von Feuchte zu verbinden, indem sich die geschmolzenen Zucker zwischen die Partikeln lagern und Wasserstoffbrückenbindungen mit den polaren Gruppen der Holzoberflächen ausbilden. Die Festigkeit ist umso höher, je höher der Anteil holzeigener Bindemittel durch die Hydrolyse ist.

Das Prinzip wird bei der Herstellung von Faserplatten im Nassverfahren genutzt.

Zwischen den verschiedenen Holzarten bestehen dabei erhebliche Unterschiede.

Lignin

Lignin kann durch Erhitzen auf 105°C geschmolzen werden. Dabei kondensiert es zu braunen, ungeschmelzbaren Stoffen. Wird bei der Aktivierung des Lignins gleichzeitig Druck angewandt, so fließt Lignin und verbindet Holzfasern zu hochverdichteten Pressholzprodukten (Lignostone). Die Mitwirkung von Holzzuckern bei dieser Reaktion ist wahrscheinlich.

Faserstoffe, die nach dem Masonite- oder dem Defibrator-Verfahren hergestellt wurden, enthalten aktiviertes Lignin und Polysaccharidprodukte, die als Klebstoff genutzt werden können.

Sulfitablauge-Lignine

Sulfitablauge lässt sich in eingedickter Form direkt als Klebstoff einsetzen. Die Klebverbindungen sind feuchtebeständig.

Tannine

Tannine sind Gerbstoffe. Sie werden aus Rinde oder Holz durch Extraktion mit Wasser gewonnen.

Sie lassen sich mit Formaldehyd methylieren und in alkalischem Medium ähnlich Phenol-Formaldehydharzen heiss härten. Genutzte Rinden sind z.B. Quebratscho oder Radiata pine. Tannine werden für feuchtebeständige Verklebungen eingesetzt.

2.4.7.2. Synthetische Klebstoffe

Duroplastische Polykondensationsklebstoffe

In diese Klebstoffklasse einzuordnen sind:

- Harnstoff-Formaldehyd-Harze
- Melamin-Formaldehyd-Harze
- Mischharze aus Harnstoff- und Melamin-Harzen
- Phenol-Formaldehydharze
- Resorcin-Formaldehyd-Harze

Beim Aushärten von Kondensationsharzen auf Basis von Formaldehyd bilden sich unlösliche und unschmelzbare Netzwerke. Je nach Art des Harzes und des eingesetzten Härtungskatalysators laufen diese Reaktionen im sauren (UF, MF, MUF, MUPF) oder im alkalischen (PF, PUF) ab.

a) Phenol-Harze

Phenolharze sind braun. Es sind die ersten synthetischen Polykondensationsharze, die industriell genutzt wurden. Als Hauptkomponente kommen Phenole und Derivate (Kresol, Xylenol) zum Einsatz. Phenole werden z.B. durch Synthese aus Steinkohlenteer, Xylenole aus Braunkohlenteer gewonnen. Für die Herstellung der Phenolharze ist die Zugabe von Kondensationsmitteln erforderlich, da die Umsetzung des Phenols mit dem Aldehyd allein zu träge verläuft. Dies erfolgt meist durch Alkali. PF Harze bilden beim Aushärten neue Kohlenstoffketten aus. Diese sind chemisch ausserordentlich stabil und haben eine hohe Hydrolyse-Beständigkeit und Kochfestigkeit der daraus hergestellten Leime (V100 Verklebung). Die Härtung erfolgt durch Wärmezufuhr bei Temperaturen um 130-150°C. PF Harze könne in weiten Grenzen variiert werden. Eine Kalthärtung ist durch starke Säuren (Paratoluolsäure) möglich. Dadurch entsteht eine gewisse Schädigung des Holzes.

b) Resorcinharze

Für Spezialzwecke werden Resorcinharze eingesetzt. Sie haben eine sehr hohe Reaktivität und eine sehr hohe Wasser- und Klimabeständigkeit. Sie eignen sich auch für die Verklebung nassen Holzes. Sie werden dort eingesetzt wo Heissverklebungen nicht möglich sind und der Einsatz von säurehärtenden PF Harzen ungenügende Festigkeiten bringt.

c) Harnstoff-Formaldehyd-Harze

Harnstoffharze sind farblos. Bei der Herstellung werden Harnstoff und Phenol in Gegenwart saurer Katalysatoren bis zum gewünschten Kondensationsgrad gebracht. Tränkharze für die Oberflächenveredlung (z.B. für KF Platten) werden weniger stark kondensiert. Bei Tränkharzen werden Harnstoff-Formaldehydharze teilweise mit Alkoholen veräthert.

Die Härtung erfolgt im sauren Medium. Je höher die Temperatur ist, umso höher ist die Härtungsgeschwindigkeit. Harnstoffharze sind nicht hydrolysebeständig. Bei hoher Feuchte wird die Leimfuge durch Hydrolyse abgebaut.

Modifizierung von UF-Leimen

Harze, die lediglich aus Harnstoff und Formaldehyd als harzbildende Bestandteile bestehen, stellen die mengenmäßig überwiegend eingesetzten preisgünstigen Leime für Span- und MDF-Platten dar. Sie weisen neben den vielen positiven Eigenschaften, die letztendlich für den weitverbreiteten Einsatz dieser Harze entscheidend sind, aber auch verschiedene Nachteile wie eine erhöhte Sprödigkeit und einen geringen Widerstand gegen hydrolytischen Einfluß durch erhöhte Luftfeuchtigkeit oder Wasser auf, insbesondere in Zusammenhang mit höheren Temperaturen. In speziellen Fällen ist daher eine Modifikation der UF-Leimharze zu empfehlen bzw. erforderlich. Chemische Modifikationen betreffen z.B. den Einbau von Melamin zur Verbesserung der Feuchte- und Wasserbeständigkeit, die Sulfitierung von Methylolgruppen oder die Cokondensation mit Ammoniak oder Aminen. Eine Plastifizierung auf physikalischem Weg ist z.B. durch Zugabe von einigen Prozent Weißleim (Polyvinylacetatdispersion) sowie von Streck- und Füllmitteln möglich.

- Cokondensation von Melamin
Die beschränkte Hydrolysebeständigkeit von ausgehärteten UF-Harzen kann durch die Zugabe von Melamin in unterschiedlicher Form verbessert werden. Reine Melamin- (MF-) Leimharze werden aus Kostengründen allerdings nicht allein, sondern immer in Kombination mit UF-Harzen eingesetzt. Lediglich im Bereich der Papierimprägnierung kommen reine Melaminharze zur Herstellung von Folien und Laminaten zum Einsatz.
- Zugabe von partiell hydrolysierten Polyamiden
Partiell hydrolysierte Polyamide mit einem verbleibenden Polymerisationsgrad von $n = 1 - 3$ sind in ihrer Salzform wasserlöslich und verfügen über eine Vielzahl an NH-Gruppen, die mit Formaldehyd oder Methylolgruppen eines UF-Harzes reagieren und somit die Wasserfestigkeit des UF-Harzes erhöhen können.
- Einbau von speziellen Harnstoffoligomeren
Die Zugabe von verzweigten Oligoharnstoffen, wie z.B. Triethylentetraharstoff, ermöglicht eine verbesserte Ausbildung eines dreidimensionalen Netzwerkes. Harnstoffoligomere mit flexiblen Zwischenketten, wie z.B. Hexamethylen-Diharnstoff, bewirken einen Abbau der im Harz während der Aushärtung entstehenden inneren Spannungen und erhöhen dadurch die Widerstandsfähigkeit gegen zyklische Klimaschwankungen.
- Cokondensation mit Aminen oder Ammoniak
Der Einbau flexibler di- und trifunktioneller Amine, z.T. mit Harnstoffendgruppen, oder der Einsatz von HCl-Salzen von Aminen als Härter (z.B. Hexamethyldiamin-hydrochlorid), die in das Harz eingebaut werden, kann ausgehärtete UF-Harze widerstandsfähiger gegen zyklische Quell- und

Schwindbewegungen machen. Durch den Einbau solcher flexiblen Gruppen werden die im Harz während der Aushärtung entstehenden inneren Spannungen abgebaut und somit die Widerstandsfähigkeit gegen zyklische Klimaschwankungen erhöht.

- **Modifizierung mit Resorcin**
Die Reaktion zwischen einem UF-Harz und Resorcin findet im sauren Bereich vor allem als Reaktion des Resorcins mit den Methylolgruppen statt, während im alkalischen Bereich die Abspaltung von Formaldehyd aus den Methylolen und die Reaktion von Resorcin mit diesem freigesetzten Formaldehyd überwiegt. Die Zugabe von Resorcin zu einem kalthärtenden UF-Harz ergibt zwar (allerdings bei preislich praktisch nicht mehr akzeptierbaren Zugabemengen) eine deutliche Verbesserung der Zugscherfestigkeit von Sperrholz nach Kochvorbehandlung der Proben.
- **Isocyanat (PMDI) als Beschleuniger und Verstärker für UF-Leime**
Kombinations- bzw. Mischverleimungen werden zur Absenkung der hohen Kosten einer reinen Isocyanatverleimung eingesetzt. Beim heute üblichen Untermischverfahren erfolgt eine Eindüsung des PMDI in das UF-Harz unter hohem Druck. PMDI kann dabei als Beschleuniger und als Verstärker für UF-Leime eingesetzt werden. Die Beschleunigung erfolgt durch Abmischung von UF-Harz und PMDI knapp vor dem Beleimungsmischer in der Mittelschicht, wobei meist eine Größenordnung von 0,5% PMDI/atro Span neben der üblichen oder geringfügig abgesenkten Mittelschicht-UF-Beleimung eingesetzt wird. Es wird über eine Verkürzung der spezifischen Preßzeit in der Größenordnung von bis zu 1 s/mm berichtet.

Die verstärkende Wirkung von PMDI als zusätzliche Quervernetzung des aminoplastischen Harzes bzw. als Bindemittel selbst wurde vor allem bei der Entwicklung formaldehydarmer Verleimungen vorgeschlagen. Dabei wird die niedrige nachträgliche Formaldehydabgabe durch eine entsprechende formaldehydarme Einstellung des aminoplastischen Harzes erreicht (Molverhältnis F/U < 1,0); die beim Einsatz solcher Harze mangelnden Eigenschaften der Platten (niedrige Querkzugfestigkeit, hohe Dickenquellung) werden durch die Zugabe von PMDI wieder ausgeglichen. Mischungen von aminoplastischen Harzen und PMDI sind allerdings nur wenige Stunden stabil, die Abmischung dieser beiden Komponenten erfolgt demnach immer nur kurz vor der Verarbeitung beim Plattenhersteller, üblicherweise online mittels Hochdruckverdüsung des PMDI in den Flüssigharzstrom knapp vor dem Beleimemischer.

d) Melaminharze

Melaminharze sind reaktiver als Harnstoffharze und können ohne Härter heiß gehärtet werden.

Sie werden aus Melamin und Formaldehyd hergestellt. Melamin ist ein Kondensationsprodukt aus 3 Molen Harnstoff. Die höhere Reaktivität der Aminogruppe bewirkt, dass die Harze ohne Härter ausgehärtet werden können.

Die beschränkte Hydrolysebeständigkeit von ausgehärteten UF-Harzen kann durch eine in unterschiedlicher Form erfolgende Zugabe von Melamin verbessert werden. Melaminharze (MF) werden aus Kostengründen allerdings als Leime praktisch nicht alleine eingesetzt; sie haben jedoch eine breite Anwendung als Imprägnier- und Tränklarze. Aus den gleichen Gründen wird auch immer nur der unbedingt erforderliche Anteil an Melamin eingesetzt; oberstes Ziel der Entwicklung bei melaminhaltigen Leimen ist demnach die Minimierung und Optimierung der eingesetzten Melaminmenge.

Harnstoffharzleime für Span- und MDF-Platten können bis zu 10% Melamin, bezogen auf Lieferform, enthalten, wobei dieses Melamin während der Kondensation zugegeben wird und chemisch einkondensiert wird (melaminverstärkte UF-Leime). Dabei bleibt im wesentlichen das Molverhältnis konstant, wobei es nunmehr als $F/(NH_2)_2$ an Stelle von F/U berechnet wird.

Melamin-Harnstoff-Mischharze (MUF-Harze) für feuchte- und wasserbeständige Platten enthalten bis zu 25% Melamin bezogen auf Flüssigleim. Die Verstärkung des UF-Harzes beruht auf der aromatischen Ringstruktur des Melamins, der höheren Hydrolysebeständigkeit der C-N-Bindungen zwischen Melamin und der Methylolgruppe sowie der Pufferwirkung und dem damit verbundenen langsameren Abfall des pH-Wertes in der Leimfuge.

Durch Polymerisation oder Polyaddition härtende Klebstoffe

Klebstoffe auf der Basis polymerisierbarer bzw. polyaddierbarer Systeme sind häufig 2-Komponentensysteme. Sie haben den besonderen Vorteil, dass sie lösungsmittelfrei eingesetzt werden können, weil mindestens 1 Komponente so niedrig molekular ist, dass die Viskosität des verarbeitungsfähigen Klebstoffes in gewünschter Weise gesenkt wird. Das Fehlen von Wasser als Lösungsmittel verhindert das Quellen und so Spannungen in den Klebfugen bei der Aushärtung (Schrumpfspannungen). Die Klebstoffe sind teurer als Polykondensationsharze. Zu dieser Gruppe gehören Epoxidharze, Polyurethane und ungesättigte Polyester. Der Einsatz ist begrenzt, Polyurethane sind derzeit stark im Kommen.

Ungesättigte Polyester

Ungesättigte Polyester werden durch Kondensation von Maleinsäure und Diolen hergestellt. Die Kondensation verläuft in Gegenwart saurer Katalysatoren (z.B. Phosphorsäure). Während des Kondensationsprozesses wird die Maleinsäure vollständig zur reaktionsfreudigeren Fumarsäure isomerisiert. Die Polymerisation wird abgebrochen, wenn sich etwa 4 bis 6 Dikarbonsäuremoleküle mit der gleichen Anzahl Diolen umgesetzt haben. Die noch heiße Reaktionsmischung wird mit dem Vernetzer gemischt und das ungesättigte Polyester erhalten. Epoxidharze haben eine sehr gute Haftung, Bindefestigkeit und Chemikalienbeständigkeit. Sie werden für Holz-Kunststoffverklebungen und Holz-Lackverklebungen eingesetzt.

Polyurethane

Dieser Klebstoff wird heute zunehmend eingesetzt. Durch seine hohe Reaktivität und die Fähigkeit, in dicken Schichten geschäumt zu werden (Schaumstoff in Polstermöbeln, Isolationsmaterial, Schäume hoher Dichte für tragende Zwecke), ist eine grosse Anwendungsbreite gegeben. PUR Klebstoffe werden als Ein- und Zweikomponentenklebstoffe gefertigt. Durch die eingebauten Isocyanatgruppen werden reaktive Gruppen in den zu verbindenden Stoffen chemisch umgesetzt, und dadurch eine besonders wirksame Haftung erzielt. PUR Klebstoffe sind unempfindlich gegen Feuchteschwankungen; auch Verklebungen im nassen Zustand sind möglich.

Als Einkomponentenklebstoffe werden Polyisocyanate eingesetzt, die bereits auf Grund der hohen Molmasse eine Klebwirkung haben.

Zweikomponentenklebstoffe werden aus Isocyanaten mit Polyolen hergestellt. Diese Stoffe sind wasserunlöslich, daher werden Lösungsmittel verwendet. Im Holzbau werden PUR-Klebstoffen teilweise Faserstoffe zugegeben, um die Festigkeit der Leimfuge zu erhöhen (geringe Festigkeit bei dicken Fugen durch die vorhandenen Hohlräume beim Aufschäumen des verwendeten Klebstoffes).

Physikalisch abbindende Klebstoffe

PVAc Klebstoffe

PVAc Klebstoffe binden bei Raumtemperatur schnell ab und haben lange Topfzeiten. Durch Kombination mit Polykondensationsharzen kann die Feuchtebeständigkeit erhöht werden.

PVAc-Leime werden aus Vinylacetat in Anwesenheit von Emulgatoren bzw. Dispersionsmitteln wie Polyvinylalkohol, Hydroxyläthyl-Cellulose usw. mittels mechanischer Hilfsmittel in Wasser fein verteilt.

Zur Auslösung des Polymerisationsvorganges werden Kalium- oder Natrium-Persulfate verwendet, die bei Erhöhen der Temperatur in Radikale zerfallen und Kettenreaktionen auslösen.

Der Polymerisationsvorgang verläuft exotherm. PVAc Leimfugen sind empfindlich gegen Kriechverformung und Wärme.

Schmelzkleber

Schmelzkleber sind 100%ig thermoplastisch härtende Klebstoffe. Sie werden bei Raumtemperatur fest und weisen keinerlei Klebrigkeit auf. Sie werden zur Verabreichung angeschmolzen und erstarren sofort nach dem Fügen. Basispolymer ist der Festigkeitsträger und klebaktiver Anteil der Klebstoffkomposition. Es besteht aus hochpolymeren Misch- und Kondensationsharzen. Vorwiegend auf der Basis von Äthylen-Vinylacetat-Polymeren.

2.4.8. Wichtige Gebrauchseigenschaften von Klebstoffen

Tabelle 14 zeigt eine Übersicht zu wichtigen Gebrauchseigenschaften von Klebstoffen.

Tabelle 14 Gebrauchseigenschaften von Klebstoffen

Klebstoff	Scherfestigkeit ¹ in kp/cm ²		pH ² Wert	Wasser- aufnahme nach 24 h Wasser- lagerung in %	Elastizi- tätsmodul in Mp/cm ²	Farbe der Klebfuge	Beständigkeit gegenüber					
	trok- ken	nach 24 h Wasser- lagerung					Was- ser 20 °C	Was- ser 100 °C	Alko- hol 96%ig	organi- schen Lösungs- mitteln	Säuren (wäß- rig) 10%ig	Laugen (wäßrig) 2%ig
Kasein	80	10	10	7...10	38	gelblich	-	-	+	+	-	-
Glutin	100	0	6			braun	-	-	-	+	-	-
Blutalbumin	100	20	9			dunkel- braun	(+)	-	-	+	-	-
Dextrin	80	0	5			gelblich	-	-	-	-	-	-
Nitrozellulose	100	10	6	0,6	10... 30	gelblich	(+)	-	-	-	-	-
Karboxymethyl- zellulose	60	0	8			farblos	-	-	+	+	-	-
Phenol-Form- aldehyd-Harz												
kalt gehärtet	100	80	3	0	10...100	braun	+	(+)	+	+	+	(+)
heiß gehärtet	100	90	10	0	10...100	braun	+	(+)	+	+	+	+
Resorzin-Form- aldehyd-Harz	100	90	7,5	0	10...100	braun	+	+	+	+	+	+
Harnstoff- Formaldehyd-Harz												
kalt gehärtet	100	10	5	0,8	80	farblos	(+)	-	+	+	-	-
heiß gehärtet	100	30...60	6	0,8	80	farblos	(+)	-	+	+	-	-
Melamin- Formaldehyd-Harz	100	70	7,5	0,1	80...100	farblos	+	(+)	+	+	-	-
Ungesättigter Polyester	80	20	4,5	0,2	40... 60	schwach gelblich	+	-	+	+	(+)	(+)
Epoxidharz												
kalt gehärtet	80	60	8	0	40... 50	farblos	+	(+)	+	+	+	+
heiß gehärtet	100	80	6	0	40... 60	farblos	+	(+)	+	+	+	+
Polyurethan	100	80	7	0	40	farblos	+	+	+	+	+	+
PVAc	100	5	5	2	25	farblos	-	-	-	-	-	-
Chlorkautschuk			7	0		gelblich	+	(+)	+	(+)	+	+
Schmelzklebstoff (PÄ/PVAc)	80	6	7	0,6	10	farblos bis braun	-	-	-	-	-	-

¹ nach TGL 7448

² pH-Wert des wäßrigen Extraktes der Klebfuge

- nicht beständig

(+) bedingt beständig
+ beständig

2.5. Holzvergütung

2.5.1. Chemisch

Die chemische Modifikation von Holz hatte ihren Ursprung bereits um 1930. Der Begriff der chemischen Holzvergütung wird entweder für eine Wechselwirkung zwischen einer Holzkomponente und einem Reagens (die zu einer kovalenten Bindung führt) oder wenn es zu oxidativen Veränderungen holzoriginärer chemischer Gruppen durch Redox-Reaktionen kommt, verwendet.

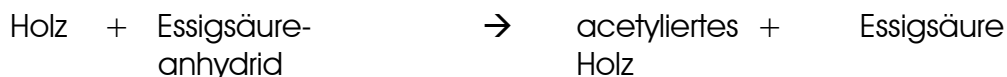
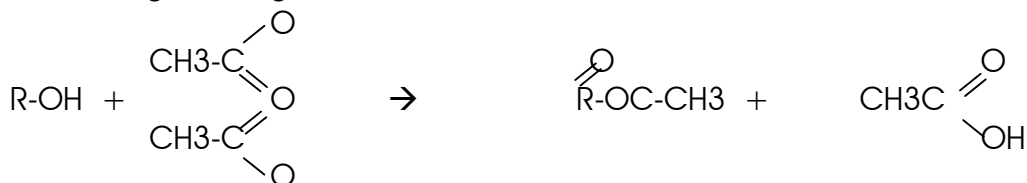
2.5.1.1. Acetylierung

(Acylierung = Acetylierung und Phtalierung; beides sind Veresterungen)

Hierbei werden die Hydroxylgruppen (R-OH) der Zellulose, der Hemizellulose oder des Lignins durch einen Säureester ersetzt. Weiters wird die innere Porenstruktur des Holzes verstopft. Damit wird die Hygroskopizität des Holzes vermindert und somit eine bessere Dimensionsstabilität erreicht (Quellen/Schwinden reduziert sich um 70 - 80%). Zudem wird der mikrobielle Abbau durch Pilze erschwert indem die funktionellen Gruppen durch die chemische Modifizierung blockiert werden.

Anders als bei der thermischen Modifikation (vgl. 2.5.3.1. Thermische Behandlung) findet sich die farbliche Veränderung des behandelten Holzes nicht als angestrebtes Ziel, sondern als Nebeneffekt mancher enzymatischer und chemischer Umsetzung.

Reaktionsgleichung:



wobei R = Ligninrückstand, Polysaccharidkette oder irgend ein anderes organisches Radikal

Die Bindungskräfte zwischen azetyliertem Holz und Wasser sind schwächer als beim unbehandelten Holz.

Bei richtiger Prozessführung hat das Verfahren keinen negativen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften (die Bruchschlagarbeit wird sogar etwas erhöht) und das Erscheinungsbild des Holzes. Die Härte wird um ca. 30% erhöht und die UV-Stabilität wird ebenfalls erhöht, wodurch die Verwitterung vermindert wird.

Das behandelte Holz enthält (wie Unbehandeltes auch) nur Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff als chemische Bausteine und bleibt damit frei von toxischen Substanzen.



Abbildung 39 Acetylierungs-Anlage in der Industrie

2.5.1.2. Phtalierung

Bei diesem Verfahren wirken die eingebrachten Molekülgruppen und der Verstopfungseffekt gegensätzlich. Während die innere Porenstruktur auch hier verstopft wird, wirken sich die Phthalylsäure-Gruppen (im Vergleich zu den alkoholischen Hydroxyl-Gruppen des unbehandelten Holzes) eher hydrophil aus.

Im Gegensatz zu azetyliertem Holz sind die Bindungskräfte zwischen phtalierem Holz und Wasser grösser als beim unbehandelten Holz.

2.5.1.3. Ammoniak

Die Behandlung mit Ammoniak bewirkt eine Plastifizierung (sie wird z.B. beim Biegen angewandt). Sie ist wirkungsvoller als das Dämpfen; scheinbar wirkt der Ammoniak sowohl auf das Lignin als auch auf die Zellulosebestandteile der Zellwandstruktur. Holzarten welche sich mit Dampf gut biegen lassen, können mit Ammoniak noch besser gebogen werden; selbst Hölzer, welche sich nicht für das Dampfbiegen eignen, können mit Ammoniak plastifiziert werden.

Es gibt zwei unterschiedliche Verfahren: einerseits tauchen in flüssigem Ammoniak bei Normaldruck, und andererseits Behandlung mit gasförmigem Ammoniak bei 10bar Überdruck.

Ammoniak ist aus grösseren Holzkörpern kaum mehr zu entfernen.

2.5.1.4. Polymerholz

Hier wird das Holz mit monomeren oder niedermolekularen Stoffen getränkt. Durch anschliessende Energiezufuhr härten diese eingebrachten Stoffe zu Kunststoffen aus (Polymerisation). Dabei wird eine Mischstruktur aus Holz und Kunststoff gebildet, welche dimensionsstabiler ist als unbehandeltes Holz und zudem bessere Festigkeitseigenschaften aufweist.

2.5.2. Biologisch

2.5.2.1. Natürliche Holzschutzmittel

Holzessig

Roher Holzessig entsteht (neben Holzgas und Holzteer) beim Erhitzen von Holz unter Luftabschluss und wird immer wieder als Holzschutzmittel empfohlen. Ein Nachweis einer Behandlung wurde jedoch bis heute noch nicht erbracht.

Waidpflanze

In kleinerem Stil werden in Deutschland von einer Firma eine Reihe von Holzanstrichen angeboten, welche Extrakte der Waidpflanze (*Isatis tinctoria L.*) enthalten. Diese war im Mittelalter vor allem wegen ihrer hohen Färbekraft von Bedeutung; eine Zulassung als pilz- oder insektenwidriges Mittel ist mittlerweile beantragt worden und hat Aussicht auf Erfolg.

Verkieselung

Aus den USA stammt die Methode der mineralischen Verkieselung. Flüssigkeiten mit Inhaltsstoffen aus Aluminiumoxid, Calciumoxid und Natriumcarbonat sollen die Inhaltsstoffe des Holzes für Schädlinge unkenntlich machen.

2.5.2.2. Enzymatische Modifikation

Durch technische oder natürliche Enzyme wird das Holz erweicht. Dadurch wird eine leichtere Holzbearbeitung ermöglicht. Bisheriges hauptsächliches Ziel der enzymatischen Behandlung war eine Verbesserung der Imprägnierbarkeit zu erzielen.

2.5.2.3. Myko-Holz

Die technisch-mykologische Holzauflockerung stellt einen gesteuerten Holzabbau durch spezielle Kulturpilze dar. Mit der Auflockerung verändert sich unter anderem die Dichte und Härte des Holzes. Die Durchwucherung von 0,4 - 1,2m langen Holzabschnitten (es wird vorwiegend Buche verwendet) dauert ca. 3 - 5 Monate und ergibt eine Rohdichte von etwa $0,45\text{g/cm}^3$. Durch weiteren Holzabbau kann sogar eine Rohdichte von $0,13\text{g/cm}^3$ erreicht werden.

Dieses Myko-Holz wird zur Bleistiftherstellung, für vergütete Holzformen in der Glasindustrie, sowie im Modellbau eingesetzt.

2.5.2.4. Enttoxifikation von Altholz

Durch die verwendeten Verfahren kann kontaminiertes Altholz wieder der weiteren stofflichen Verwertung zu geführt werden. Studien dazu sind an der TU Dresden am laufen.

2.5.3. Physikalisch

2.5.3.1. Thermische Behandlung

Um eine thermische Holzmodifikation handelt es sich, wenn Temperaturen von deutlich $> 100^{\circ}\text{C}$ über einen gewissen Zeitraum, in einem 1 oder mehrstufigen Prozess unter einer (Inert)Gasatmosphäre gefahren werden.

Die hauptsächlich genannten Argumente für eine solche Behandlung sind:

- 1.) Dimensionsstabilität wird erhöht
- 2.) ökologischer Aspekt (Tropenholzalternative, keine Chemikalien)
- 3.) Dauerhaftigkeit wird erhöht (gegenüber Pilzen)
- 4.) Aussehen (dunklere Farbe, Holzstruktur wird hervorgehoben)

Wesentliche Parameter für die Prozessführung sind:

- Holzart
- Anfangsfeuchte
- Geometrie und Probengrösse
- Behandlungstemperatur
- Verweilzeit im Ofen
- Art der Atmosphäre
- Druck
- Präsenz eines Katalysators

Der Abbau des Holzzuckers erfolgt so, dass sie später von Fäulepilzen nicht mehr genutzt werden können. Zudem kommt es zu einer gleichmässigen Verteilung der holzeigenen Abwehrstoffe. Gegenüber Insekten weisen die behandelten Hölzer jedoch keine gesteigerte Resistenz auf.

Der Effekt der Dauerhaftigkeit hängt auch mit der verminderten Fähigkeit Wasser langfristig aufzunehmen zusammen. Der selektive Abbau der Hemizellulosen führt zu einer Reduktion der Hydroxylgruppen; dadurch wird die Hygroskopizität verkleinert und die Dimensionsstabilität erhöht.

Das Holz wird in seiner ganzen Tiefe behandelt; eine Ausnahme ist hier nur das Eindringen des Öles beim Öl-Hitze-Verfahren.

Gegenüber einem direkten Bodenkontakt sind thermisch behandelte Hölzer nicht widerstandsfähiger als unbehandelte; von einem solchen Einsatz wird allgemein abgeraten.

Grösster Schwachpunkt sämtlicher thermischer Behandlungen ist derjenige, dass das Holz fast nicht mehr für den konstruktiven Bereich verwendet werden kann. Die thermische Modifikation des Holzes führt nämlich zu einer starken Festigkeitsabnahme des Holzes; statischen Belastungen kann das behandelte Holz nicht mehr ausgesetzt werden. Durch den Entzug des (gebundenen) Wassers verliert das Holz den plasifizierenden Effekt und wird spröde.

Die Weiterverarbeitung des behandelten Holzes ist erschwert. Bei der Verleimung wird mehr Trocknungszeit gebraucht (da das Holz ja das Wasser nur sehr langsam aufnimmt) und die Gefahr des Aufspaltens beim Bohren und Nageln ist grösser.

Da Nadelhölzer eher im Aussenbereich eingesetzt werden, fällt die Behandlung stärker aus als bei Laubhölzern. Während im Aussenberich vor allem die

Wasserresistenz wichtig ist, zählt im Innenbereich (Laubhölzer) eher die Farbe und die Oberflächenqualität.

Thermisch

(Plato-Verfahren, Niederlanden; bois réifié, Frankreich; Balz Holz, Schweiz)

Bei der Retifikation wird das Holz unter einer Stickstoff-Atmosphäre der Hitze ausgesetzt. Die Behandlungsdauer (0.5 - 4h) und die Temperatur (160 - 270°C) variieren je nach Hersteller und gewünschtem Effekt. Beim Plato-Verfahren wird zudem im Prozesstank noch ein Überdruck erzeugt.

Hydrothermisch

(Thermowood, Finnland; bois perdue, Frankreich)

Das Verfahren der hydrothermischen Behandlung (auch Retifikation genannt) unterscheidet sich von obigem Verfahren dadurch, dass die Behandlung unter einer Wasserdampf-Atmosphäre erfolgt. Die Temperatur (180 - 240°C) und die Zeitdauer (24 - 46h für den ganzen Zyklus) variieren auch hier (vgl. auch Abbildung 40).

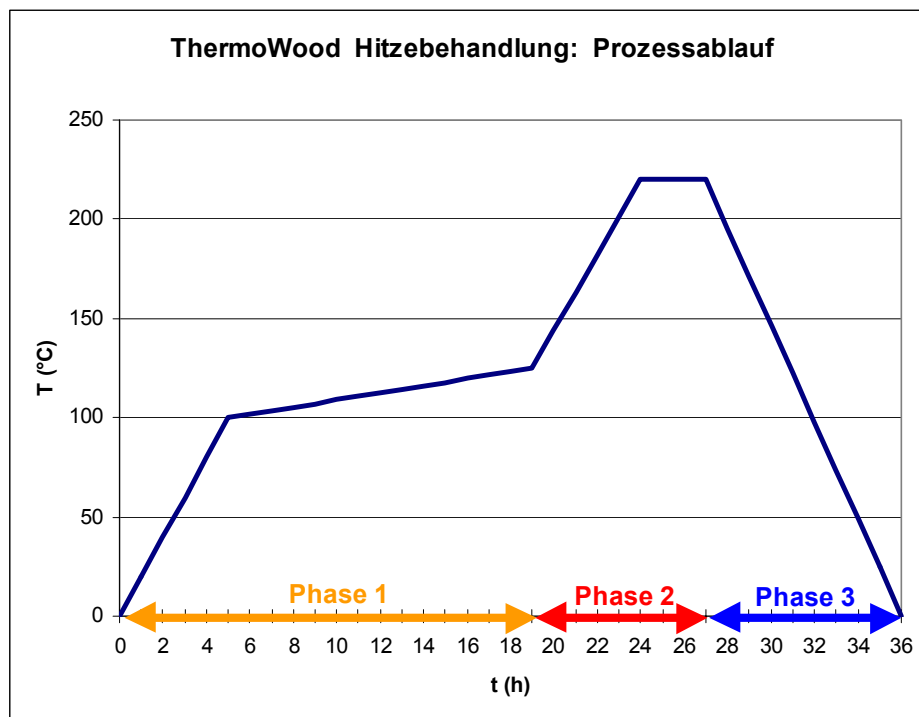


Abbildung 40 Prozessablauf zur Herstellung von Thermowood

Öl-thermisch

(Menz Holz, Deutschland)

Hier wird das Holz in einem Bad aus Pflanzenöl (zumeist Leinöl) während mehreren Stunden (2 - 5h) mit der gewünschten Temperatur (180 - 260°C im Holzinnern, Abbildung 41) erhitzt. Zusätzlich zu der chemischen Modifikation durch die Hitze dringt das Leinöl in die äusseren Zellen ein und bewirkt somit einen zusätzlichen Schutzeffekt (das Holz wird wasserabstossender).

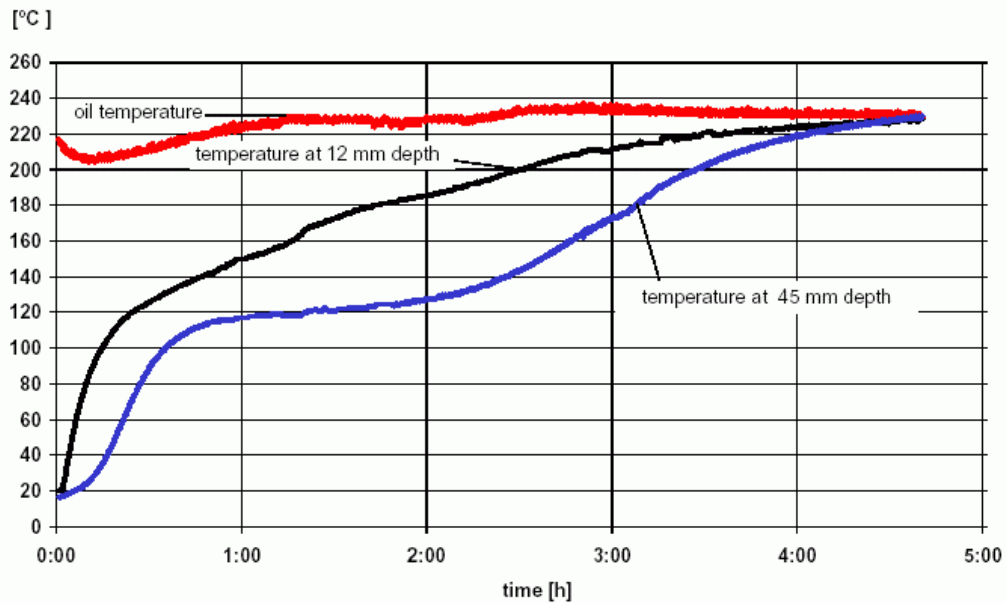


Abbildung 41 Temperaturverlauf bei der öl-thermischen Vergütung



Abbildung 42 Prozesstank der deutschen Menz Holz

2.5.3.2. Strahlentechnische Vergütung

Unbehandeltes Holz

Mit zunehmender Strahlungsdosis nimmt zuerst nur die Zugfestigkeit des Holzes ab. Dies rührt daher, dass die Zellulose stärker auf die Strahlung reagiert als das Lignin. Ab einem gewissen Strahlungsniveau zeigen aber alle Festigkeitseigenschaften fallende Tendenzen.

Polymerholz

(vgl. Kapitel 2.5.1.) Hierbei wird das Holz vorgängig mit monomeren oder niedermolekularen Stoffen getränkt und dann der Strahlung ausgesetzt. Durch diese

Energiezufuhr kommt es im Holz zur Bildung von Grossmolekülen ("Kunststoffen"), welche die Festigkeitseigenschaften deutlich erhöhen.

2.5.4. Mechanisch (Druck)

Pressvollholz:

Durch den Druck wird eine Verringerung des Porenvolumens im Holz und somit eine Vergrösserung der Rohdichte erreicht (die Zellhohlräume werden mit arteigenen Zellwandsubstanzen ausgefüllt). Bei der Herstellung von Pressvollholz muss aber beachtet werden, dass keine gravierenden Gefügezerstörungen entstehen. Die Pressdrücke liegen bei $100 - 200 \text{kp/cm}^2$ ($= \text{N/cm}^2 = 1 - 2 \text{kg/mm}^2$), wobei das Holz vorgängig bei $150^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ und Überdruck in einer Dampfatosphäre erweicht wird. Das Holz wird durch das Pressen nicht isotrop, sondern behält auch nach der Behandlung die anisotropen Eigenschaften.

Verwendung finden meist zerstreutporige Laubhölzer (Buche, Pappel, Ahorn und andere), nicht aber Nadelholz. Dies, da in folge der stark unterschiedlichen Dichte und Härte ihres Früh- und Spätholzes es zu einer ungleichmässigen Verdichtung und Beschädigung des Holzgefüges kommt; zudem ist die Rückfederung der Verdichtung erheblich.

Das Ziel der Pressholzherstellung ist der Ersatz unzureichend vorhandener Mengen besonders harter und fester Holzarten für Sonderzwecke im Maschinenbau.

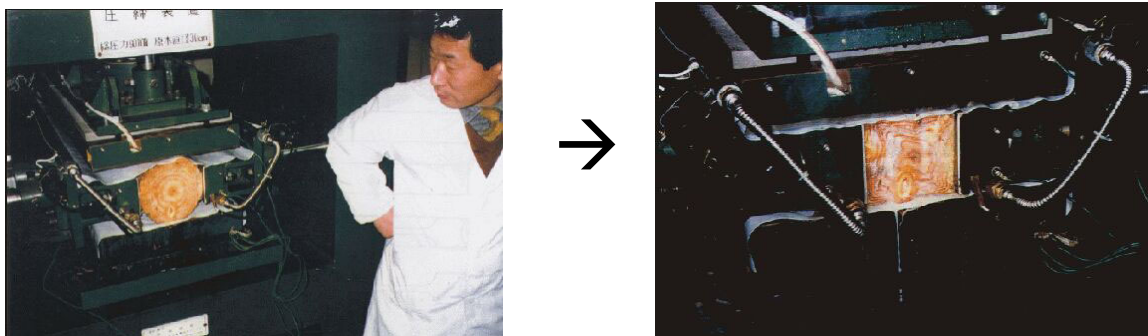


Abbildung 43 Herstellung eines viereckigen Baumstammes

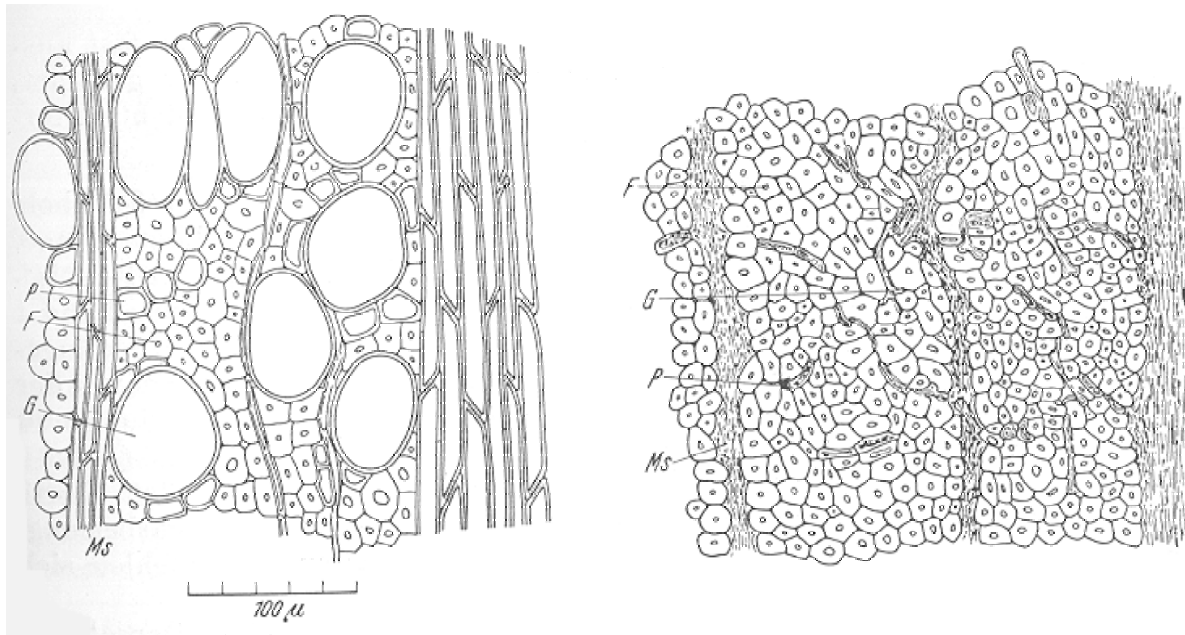


Abbildung 44 Blick durchs Mikroskop: links → Buchenholz; rechts → Pressholz

Stauchholz

Das Holz wird am Anfang des Herstellungsprozesses gedämpft, gekocht, oder mit Hochfrequenzwellen behandelt. Soll nicht das ganze Holzstück gebogen werden, kann auch nur ein Teilstück erwärmt werden.

Anschliessend wird der Holzkörper in Richtung der Fasern gestaucht, wodurch das Holz formbar wird. Die Pressdrücke betragen bis zu 90% der Druckfestigkeit des Holzes. Die Formbarkeit beruht auf dem Falten der Zellwände und einer Erweichung der Mittellamelle, wodurch der Faserverband gelockert wird.

Es ist bisher noch nicht gelungen, Nadelholz auf diese Weise zu biegen (vgl. vorher). Erst nach dem Stauchen ist die Biegebarkeit erreicht, welche im kalten Zustand erfolgen kann. Das Holz muss aber nicht sofort nach dem Stauchen gebogen werden, sondern kann bis zu 6 Monate gelagert werden. Dabei ist aber zu beachten, dass die Holzfeuchtigkeit nicht unter 25% sinkt. Das Biegen erfolgt analog dem Kapitel 2.5.5.

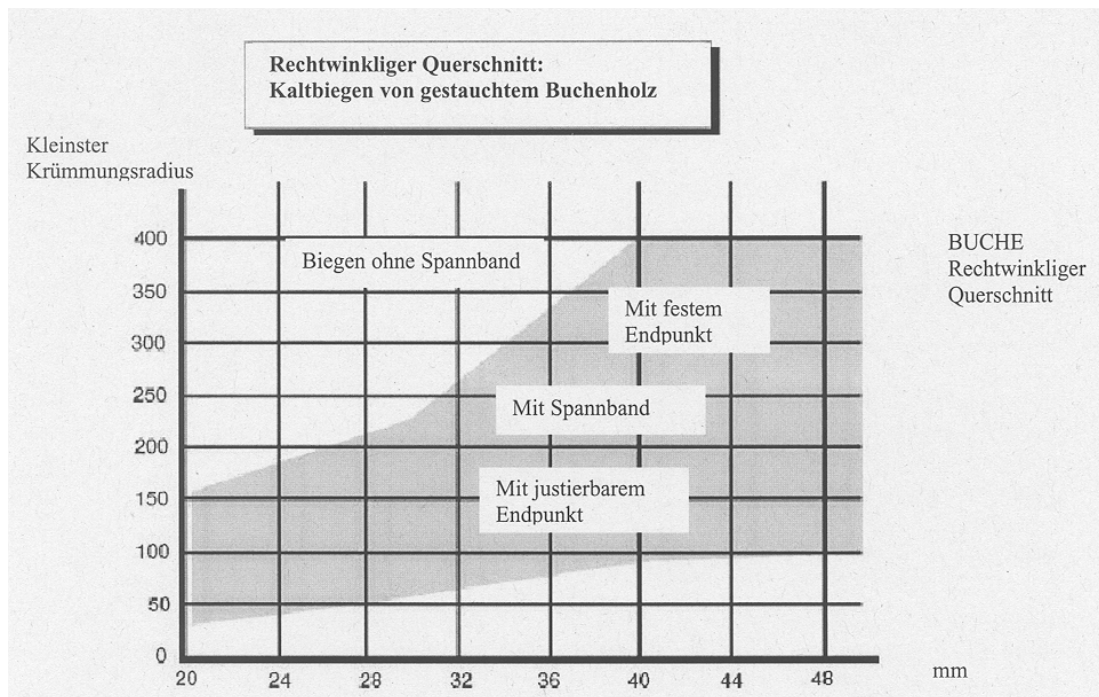


Abbildung 45 Diagramm der Biegebarkeit von Holz mit Biegeband (grauer Bereich) und ohne Biegeband (oberhalb grauem Bereich)

2.5.5. Verformung von Holz

Die Verformung des Holzes geschieht in 3 Prozessschritten:

- 1.) Plastifizierung
- 2.) Biegen (Umformen)
- 3.) Stabilisieren (Fixieren)

Bei der **Plastifizierung** wird das Holz entweder gedämpft, gekocht oder mit Hochfrequenzwellen behandelt, was zu einer Erweichung des Lignins in der Mittellamelle führt. Dadurch können die einzelnen Holzfasern gegeneinander verschoben werden (die sekundären Bindungen reißen, die Makromoleküle gleiten aneinander vorbei). Wird nicht das ganze Holzstück gebogen, kann auch nur ein Teilstück erwärmt werden.

"Plastisch" bedeutet, dass das Material bei äusserer Krafteinwirkung anfänglich eine elastische, also reversible Deformation erleidet, bei Erreichen einer bestimmten Spannungsgrösse, der sogenannten Fließspannung, jedoch zu fließen beginnt. Beim Nachlassen der Spannung wird nur der elastische Teil der Verformung wiedergewonnen (der sogenannte "Spring back"-Effekt).

Das **Biegen** muss erfolgen, solange das Werkstück noch warm ist. Thonet hatte 1837 entdeckt, dass es bei einem Verhältnis Biegeradius : Holzdicke von über 30 immer zu Holzbrüchen kommt. Und zwar erfolgen diese immer auf der konvexen Seite (Zugbelastung), während auf der konkaven Seite (Druckbelastung) Stauchfalten auftreten. Die Lösung des Problems bestand darin, dass Thonet die Biegung über ein Biegeband mit zwei Begrenzungen am Bandende durchführte (Abbildung 46). Dieses Band wird auf der Zugseite angelegt und bewirkt, dass die Dehnung auf ein geringes verringert wird und die neutrale (=spannungsfreie) Schicht von der Mitte

des Werkstückes in Richtung der rissgefährdeten konvexen Oberfläche wandert. Dadurch erfährt das Werkstück im ganzen Querschnitt fast nur noch eine Stauchung.

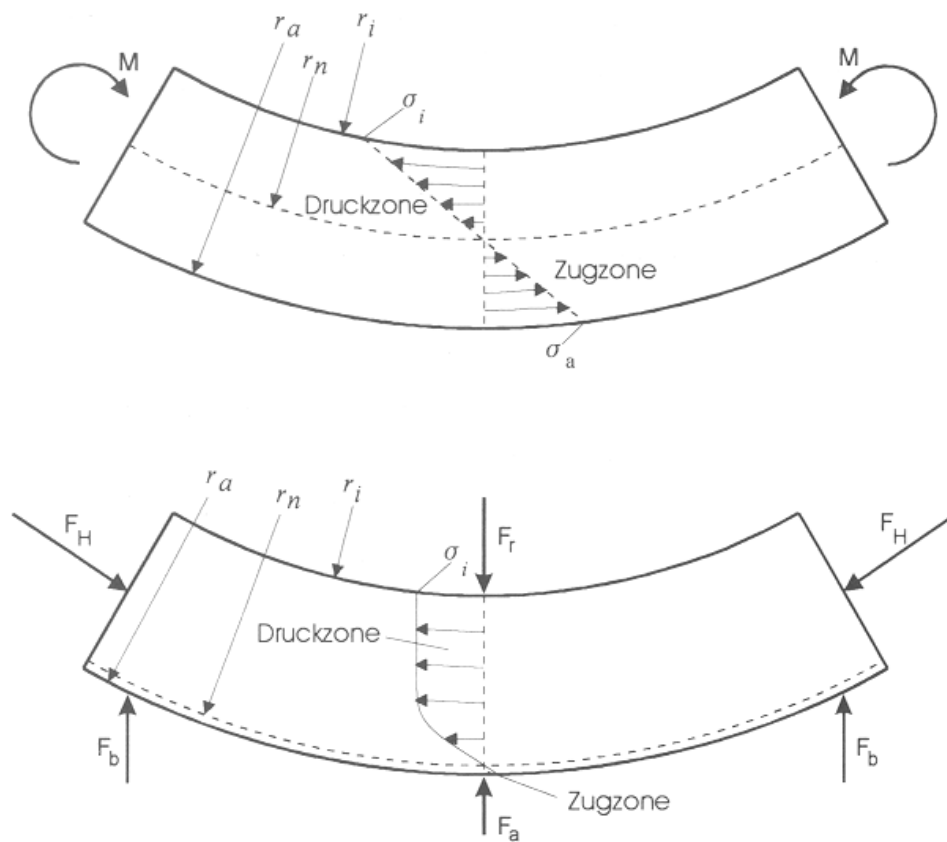


Abbildung 46 Wirkungsweise eines Biegebandes (unten); durch den Druck des Biegebandes (F_b) und der Anschlagstücke an den Enden des bandes (F_H) wird die neutrale Zone auf die Zugseite hin verschoben.

Fixieren

Während der Trocknung wird das Holzstück in der gewünschten Position fixiert, wodurch es schliesslich seine Form behält (die sekundären Bindungen können sich nach der Verschiebung an anderer Stelle wieder neu absättigen). Das Holz erhält zudem während der Trocknung einen Grossteil seiner ursprünglichen Festigkeit zurück. Der durchschnittliche Festigkeitsverlust beträgt 10 -15% gegenüber nicht gestauchtem Holz. Wird das Holzstück aus der Fixierung genommen, so federt es ein wenig zurück ("Spring back"-Effekt).

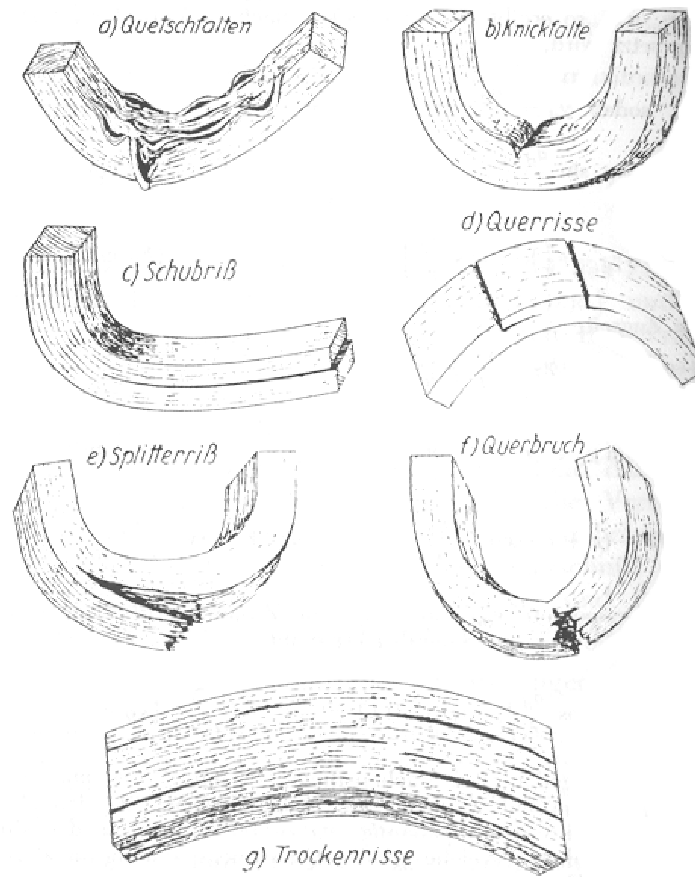


Abbildung 47 Biegefehler welche auftreten können



Abbildung 48 Möglichkeiten für das Biegen von Holz

2.6. Literatur zu Kapitel 2

- Autorenkollektiv (1970):** Taschenbuch der Holztechnologie. Leipzig.
- Autorenkollektiv (1984):** Wissenspeicher Holztechnik. Fachbuchverlag, Leipzig.
- Autorenkollektiv (1984):** Holzbearbeitung. Fachbuchverlag, Leipzig.
- Autorenkollektiv (2002):** Modifiziertes Holz; Eigenschaften und Märkte. Holzwirtschaft an der BoKu Wien, Lignovisionen Band 3: 260 S.
- Bollmann (1984):** Firmenschrift der Fa. Bollmann: Leitfaden der Holz Trocknung. Singen.
- Bosshard, H.H. (1984):** Holzkunde 3, Aspekte der Holzbearbeitung und Holzverwertung. Birkhäuser Verlag: 286 S.
- Dunky, M.; Niemz, P. (2002):** Holzwerkstoffe und Leime. Springer Verlag. 954 S.
- Eichler, H. (1978):** Praxis der Holz Trocknung. Fachbuchverlag, Leipzig.
- Egger, O.T. (1995):** Untersuchung der Einflussgrößen beim Biegen von Vollholz. Dissertation an der Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik der Universität Stuttgart. 115 S.
- Ettelt, B. (1987):** Sägen, Fräsen, Hobeln, Bohren. DRW Verlag, Stuttgart.
- Gfeller, B. (2000):** Skript Holztechnologie 2. ETH Zürich: 74 S.
- Hoadley, R.B. (1990):** Holz als Werkstoff: Ravensburger Holzwerkstatt. Ravensburger Verlag, Ravensburg: 280 S.
- Holz-Lexikon (1988):** 3. Nachdruck 1993. DRW-Verlag.
- Keey, R.B.; Langrish, T.A.G. (1999):** Kiln-Drying of Lumber. Springer Verlag, Berlin.
- Kollmann, F. (1955):** Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Zweiter Band. Springer Verlag: 1183 S.
- Langendorf, G., Eichler, H. (1973):** Holzvergütung. VEB Fachbuchverlag, Leipzig: 171 S.
- Lohmann, U. (1999):** Holz Handbuch. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen: 351 S.
- Mahlke, Troschel, Liese (1950):** Holzkonservierung. Springer Verlag, Berlin: 571 S.
- Seubert-Hunziker, H. (2001):** Skript Holzkunde 2, Teil Holzchemie. ETH Zürich 42 S.
- Vorreiter, L. (1958):** Holztechnologisches Handbuch. Band II. Verlag Georg Fromme & Co. 641 S.
- Wagenführ, A. (2002):** Grundlagen der Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik, Teilkomplex Holz- und Faserwerkstoffe, Unterlagen für das Fernstudium.

www.balz-holz.ch	→ Schweizer Hersteller von therm. beh. Holz
www.basf.de/de/produkte/chemikalien/lt	→ Leime
www.bes-bollmann.de	→ Trocknungstechnik
www.collano.com	→ Leimhersteller
www.compwood.dk	→ Gestauchtes Holz
www.holzfeuerung.ch/deutsch/Maschinen/Produkte/leimpress.htm	→ Verleimmaschinen
www.irg-wp.com	→ International research group on wood preservation
www.kiln-direct.com	→ Trocknungstechnik
www.kuper.de	→ Verleimmaschinen
www.lebois.ch	→ thermisCHwood (Schweizer Hersteller von therm. beh. Holz)
www.platowood.nl	→ Platowood
www.refifie.com	→ Retifikation
www.thermowood.fi	→ Thermowood
www.vanicek.com	→ Trocknungstechnik
www.woodmodification-network.org	→ Holzmodifikation in Europa