

Plastifizierung von Bugholz mit Hochfrequenz oder Wasserdampf

Obwohl das Biegen von Voll- oder Massivholz ein seit langem bekanntes Verfahren ist, treten bei der industriellen Anwendung immer wieder Fragen auf. Die Ursache ist vor allem darin zu sehen, daß die Grundlagenkenntnisse zur Anwendung der weiterentwickelten Technik nur zum Teil vorhanden sind. Andererseits erfährt das Holzbiegen gerade im Hinblick auf eine optimierte Rohstoffausnutzung und den sich daraus ergebenden wirtschaftlichen Vorteilen eine ständig wachsende Bedeutung. Der folgende Beitrag zeigt Entwicklungstendenzen für das Plastifizieren mit Hochfrequenz auf und stellt dieses Verfahren dem konventionellen Dampfplastifizieren gegenüber. Von Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel und Dipl.-Ing. Otto Th. Eggert¹⁾.

Allgemeine Einflußgrößen beim Holzbiegen

Für einen erfolgreichen Biegevorgang von Voll- oder Massivholz sind verschiedene Einflußgrößen zu beachten. Die wichtigsten sind:

1. die Holzart,
2. der Faserverlauf (Anisotropie des Holzes) im Biegeteil,
3. die Plastifizierung und
4. das Biegeverfahren.

Während die Holzart und der Faserverlauf werkstoffspezifische Einflußgrößen

sind, stellen die Plastifizierung und das Biegeverfahren Kriterien dar, die durch äußere Einwirkungen hervorgerufen werden und somit auch beeinflussbar sind.

Zunächst wird als wichtige Einflußgröße des Biegevorganges die Holzart genannt. Das Biegeverhältnis $B = d/r$ (d : Dicke des Holzteiles, r : Biegeradius an der Werkstückinnenseite) ist der Ausdruck für die Biegebarkeit der einzelnen Holzarten. Wie die mechanischen Eigenschaften (Dichte, Festigkeit, Ela-

stizitätsmodul) der verschiedenen Holzarten differieren, bestehen auch Unterschiede im Biegeverhältnis. Eine ausführliche Tabelle hierzu ist im „Wood Bending Handbook“ [1] erschienen, die eine Übersicht über die Biegeeigenschaften von 147 ausgewählten Holzsorten enthält. Darüber hinaus bestehen auch Unterschiede in der Biegebarkeit verschiedener Hölzer ein und derselben Holzart.

Nach F. Fessel [2], der sich bei seinen Untersuchungen auf Holz der Traubeneiche konzentrierte, ist langfaserigem, zähem Eichenholz, wie es zum Beispiel in Berglagen, an Nordhängen und bei bestimmter Bodenbeschaffenheit wächst, der Vorzug zu geben vor kurzfaserigem, sprödem Holz der gleichen Sorte. Er begründet seine Aussage damit, daß durch verschiedene Wachstumsbedingungen Hölzer gleicher Art sehr verschiedene Struktur haben, wodurch auch ihre Biegeeigenschaften sehr unterschiedlich sein können.

Generell empfehlen sich für das Holzbiegen Holzarten mit möglichst homogenem Wuchs, also geringen Unterschieden zwischen Früh- und Spätholzanteil. Diese Forderung ist zum Beispiel bei dem Holz der Rotbuche erfüllt, die schon seit Thonet [3] in der Vollholzbiegeerei bevorzugt verwendet wird, und mit der auch die folgende Untersuchung durchgeführt wurde. An dieser Stelle sei noch ergänzt, daß Äste und ähnliche Inhomogenitätsstellen in der Biegezone in der Regel zu Biegefehlern führen. Das Holz ist vor dem Biegen grundsätzlich diesbezüglich zu prüfen.

Als zweiter Punkt ist der Faserverlauf des Holzes im Biegeteil genannt. Es empfiehlt sich, aufgrund der Anisotropie (Richtungsabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften) des Holzes, die Längsachse des Biegeteiles immer genau in Faserrichtung zu legen, um Biegefehlern vorzubeugen. Über die optimale Lage der Jahrringe liegen in der Literatur verschiedene Aussagen vor. In der Praxis des Holzbiegens wird es sich aber kaum realisieren lassen, das Holz so einzuschneiden, daß die Jahrringe stets senkrecht zur Biegerichtung liegen. Sofern die Jahrringe annähernd parallel zur Biegerichtung stehen, ist allerdings die Gefahr gegeben, daß sie, wie in Abb. 1 zu sehen ist, stellenweise aufgrund der auftretenden Schubspannung abstoßen, oder das Biegeteil im Falle einer kritischen Geometrie ausknickt.

Die Einflußgröße Plastifizierung wird im weiteren Verlauf noch ausführlich diskutiert. Sie sei daher an dieser Stelle nicht weiter erwähnt.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Biegeverfahren. Hierbei muß hauptsächlich nach dem Biegen mit oder ohne Zugband unterschieden werden. Beim Biegen ohne Zugband entsteht an der Außenseite des Bugholzes eine Zugzone, in der das Holz entsprechend den auftretenden Biegespannungen gelangt

Abb. 1: Biegefehler: Abstoßende Faser und ausgeknicktes Bugholz aufgrund ungünstigen Faserverlaufes



¹⁾ Professor Dr.-Ing. Uwe Heisel ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart mit dem Versuchsfeld für Holzbearbeitungsmaschinen. Dipl.-Ing. O. Eggert ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am selben Institut.

wird. Da Holz Zugspannungen und eine daraus resultierende Längung nur in einem sehr geringen Bereich erlaubt, entstehen Quer- beziehungsweise Splitters, sobald die maximale Längsdehnung überschritten ist. Diese ist unter anderem abhängig von der Holzart und dem Biegeverhältnis d/r .

In ausgeführten Anlagen, die ohne Zugband arbeiten, wird in der Regel mit Hochfrequenz direkt während des Biegevorganges plastifiziert. Dabei wird im allgemeinen das Voll- oder Massivholz in Hochfrequenz-Furnierleimpressen [4] gebogen. Neben den sehr engen Einsatzgrenzen ist das Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß das Plastifizieren, das Biegen und das Stabilisieren (Trocknen) in einem Arbeitsgang vereint sind (Abb. 2).

Das Biegen mit Zugband ist auch als Thonet-Verfahren allgemein bekannt. Die bei einem Biegevorgang grundsätzlich auftretenden Zugspannungen werden hierbei von einem Zugband aufgenommen und die Längung der Außenseite verhindert. Die neutrale Faser befindet sich demnach im Grenzbereich zwischen Zugband und Biegeteil. Mit diesem Verfahren lassen sich unter sonst gleichen Bedingungen deutlich größere Biegeverhältnisse d/r erzielen als ohne Zugband. Durch die auftretenden Druckspannungen entstehen im Holz plastische Verformungen, wobei sich die Zellhohlräume allmählich schließen. Kollmann [5] betrachtet deshalb den Werkstoff Holz als kompressibel, und Teichgräber [6] berichtet über eine Zunahme der Rohgewichte in der Biegezone. Diese Betrachtungen decken sich mit Erfahrungen aus der Praxis, wonach in der Biegezone keine oder nur minimale Querschnittsänderungen auftreten.

Übersicht der Plastifizierungsverfahren

Um Holz einwandfrei biegen zu können, bedarf es einer Vorbehandlung (Plastifizierung) des Werkstoffes. Die Literatur schlägt hierzu eine ganze Reihe von Verfahren vor. Sie können unterteilt werden in:

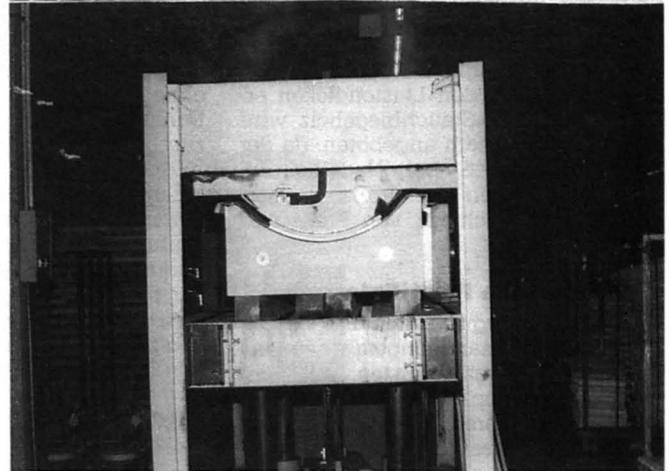
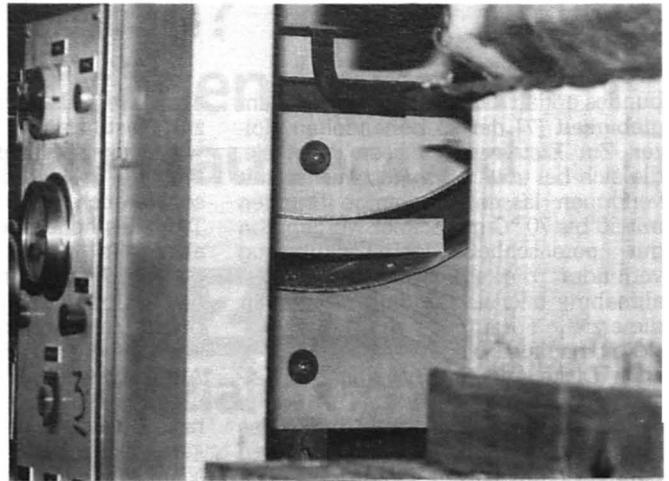
- chemische,
- thermo-mechanische und
- thermische Verfahren.

Im Zusammenhang mit dem Holzbiegen treten viele Fragen zum Plastifizieren auf. Daher soll im folgenden eine kurze Übersicht über die Plastifizierungsverfahren gegeben werden:

a) Chemische Plastifizierung

Zur chemischen Plastifizierung wird das Bugholz in einer Lösung aus Ammoniak, Harnstoff oder Hydrazin getränkt. Hierdurch wird eine gute bis sehr gute Formbarkeit des Holzes erreicht. Da sich das Holzbiegen aber gerade als besonders umweltgerechtes Fertigungsverfahren empfehlen will, sind diese Methoden der Plastifizierung abzulehnen.

Abb. 2: Biegen von Vollholz ohne Zugband in einer Hochfrequenz-Furnierleimpresse. Oben: Beginn des Biegevorganges, unten: Ende des Biegevorganges mit Stabilisieren der Werkstücke.



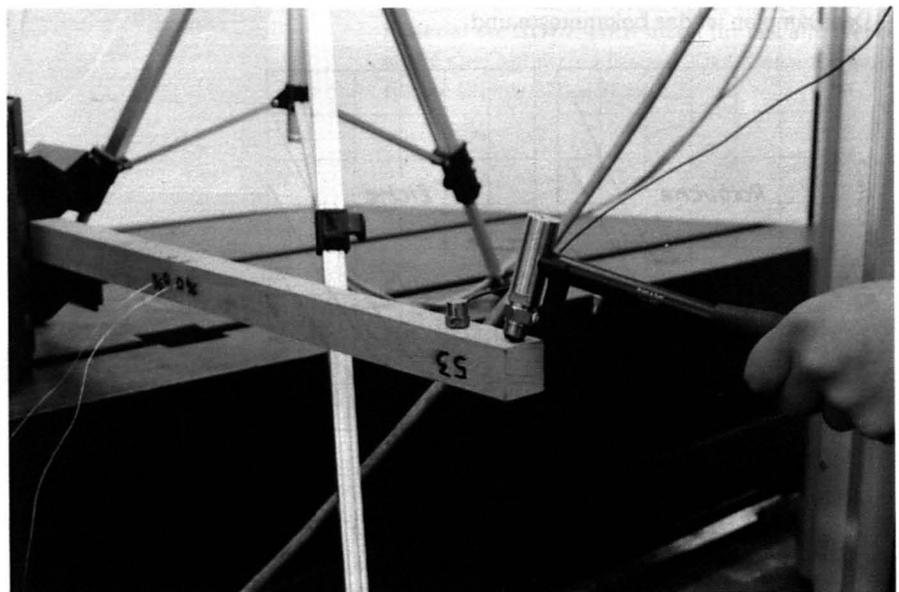
Weiterhin ist beim Einsatz der chemischen Plastifizierung zu bedenken, daß hierdurch ein Zersetzungsvorgang im Holz eingeleitet wird, der auch nach dem erfolgten Biegevorgang und der anschließenden Stabilisierung des Holzes weiter wirkt. Wohl aus diesen Gründen ist den Verfassern kein industrieller Einsatz der chemischen Plastifizierung bekannt.

b) Thermo-mechanische Plastifizierung

Mit dieser Methode wird das sogenann-

te Stauchbiegeholz, auch bekannt als „Patent-Biegeholz“ (Gesellschaft für Holzveredelung, Selters) hergestellt. Dieses Holz wird zunächst in heißem Dampf plastifiziert, danach unter großem Druck in Faserlängsrichtung mechanisch gestaucht. Durch die hierbei auftretende Lockerung des Faser-

Abb. 4: Einseitig eingespannter Probekörper mit Piezo-Beschleunigungsaufnehmer und Kraftmeßhammer. Ebenfalls zu sehen: Thermoelemente (links am Holz).



bundes erklärt sich die bleibende Nachgiebigkeit [7] der so behandelten Hölzer. Zur Erstarrung müssen die Teile, die sich bei etwa 15 % Holzfeuchte kalt verformen lassen, für einige Stunden mit 60 bis 70 °C getrocknet werden. Ein gut porenschließender Lacküberzug verhindert die erneute Feuchtigkeitsaufnahme und sichert damit dauerhaft die erzielte Form.

Das mögliche Biegeverhältnis liegt, je nach Dicke und Feuchtigkeit der Leisten, etwa bei $0,5 \leq d/r \leq 0,1$. Es ist allerdings vorstellbar, daß durch das Biegen eine Längung der äußeren Randfaser nur soweit möglich ist, wie das Holz zuvor gestaucht wurde. Dies würde die von Vorreiter [8] gefundene Kurve zur Abhängigkeit der möglichen Biegeradien von den Leistendicken erklären (Abb. 3). Stauchbiegeholz wird nur aus Laubhölzern angeboten, da der Herstellungsprozeß bei Nadelhölzern, vermutlich wegen der großen Dichte- und Härteunterschiede von Früh- und Spätholz, versagt.

c) Thermische Plastifizierung

Unter diesem Begriff sollen alle Plastifizierungsarten zusammengefaßt sein, bei denen Holz durch Erhitzen, mit oder ohne Zugabe von Wasser, in den plastisch verformbaren Zustand überführt wird. Es sind dies im wesentlichen:

- Kochen,
- Dämpfen und
- dielektrische Erwärmung.

Beim Kochen wird das im aufgeheizten Wasser untergetauchte lufttrockene Holz erwärmt und unter hoher Wasseraufnahme aufgeweicht. Die Heißwassertemperatur beträgt etwa 90 °C. Pro mm Holzdicke ist eine Koch- und Tauchdauer von etwa 1 bis 1,5 min erforderlich [9]. Dem Vorteil der sehr guten Plastizität steht der Nachteil gegenüber, daß sich die Holzaußenschichten mit Wasser sättigen, wodurch eine aufwendige Trocknung erforderlich wird.

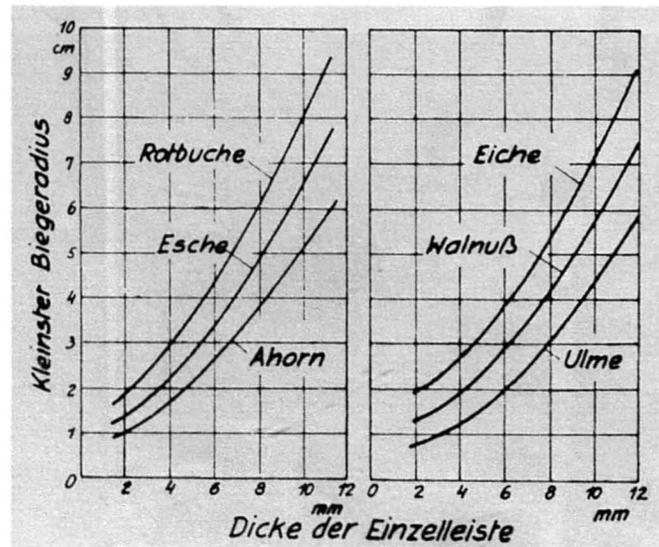
Das Dämpfen ist das bekannteste und

am universellsten einsetzbare Verfahren zur Plastifizierung von Holz. Es wird, wie auch das Kochen, zur Vorbehandlung von Furnierhölzern in gleicher Weise wie auch von Bughölzern eingesetzt. Trotz des hohen Bekanntheitsgrades ist aber sein Einsatz von vielen Fragen begleitet. Zum einen herrscht Unklarheit darüber, ob das Plastifizieren im Dampf mit oder ohne Überdruck effizienter ist. Bei der Anwendung von Autoklaven (Druckkesseln) stellt sich überdies die Frage, in welchen Temperatur-Bereichen und bei welchen Drücken sich die günstigsten Eigenschaftsänderungen einstellen.

Sowohl Fessel [2] als auch Stevens & Turner [1] empfehlen, zur Plastifizierung das Holz einer Dampf-atmosphäre ohne Überdruck (entsprechend einer Dampftemperatur von etwa 100 °C) auszusetzen. Hierbei wird ein optimales Verhältnis von Feuchteaufnahme zu Erhitzung des Holzes erzielt. Diese Empfehlung deckt sich mit eigenen Beobachtungen der Verfasser. Dem steht allerdings die Aussage Kollmanns [10] gegenüber, der gespannten Dampf mit $p_{e \text{ max}} = 0,2 \text{ MPa}$ (p_e : Überdruck, 0,1 MPa entspricht 1 bar) als wesentlich wirksamer ansieht. Grundsätzlich ist bei der Dampfplastifizierung mit Überdruck darauf zu achten, daß die Bedingungen für eine Naß- oder Satt-dampf-atmosphäre exakt eingehalten werden. Eine auch nur geringe Überschreitung der Satt-dampf-linie bewirkt, daß das Holz stattdessen getrocknet wird, was dem Wunsch nach effizienter Plastifizierung entgegensteht. Der Anlagenaufwand für eine Plastifiziereinrichtung bei Umgebungsdruck ist zudem wesentlich geringer als für eine Anlage, die mit Überdruck arbeitet.

Bei der dielektrischen Erwärmung werden elektrische nicht leitende Materialien mittels Hochfrequenz (HF) zwischen zwei Elektroden erwärmt. Im Holz

Abb. 3: Abhängigkeit von Leistendicke zu möglichem Biegeradius (nach Vorreiter, [8])



geschieht dies insbesondere dadurch, daß die Wasseranteile durch das hochfrequente Feld zu Schwingungen ange-regt werden, wodurch Reibung und damit Wärme entsteht. Hierdurch wird das Holz gleichmäßig über den gesamten Querschnitt erhitzt, die Wasseranteile gehen in den dampfförmigen Zustand über und treten aus dem Holz aus. Als Folge trocknet Holz unter Hochfrequenz sehr schnell [11]. Soll Holz mit Hochfrequenz plastifiziert werden, so ist darauf zu achten, daß das Holz vor der Plastifizierung genügend Feuchtigkeit aufgenommen hat, weil es andernfalls lokal austrocknet und dadurch versprödet.

Einfluß des Elastizitäts-Moduls auf die Biegeigenschaften

Formelzeichen:

E: E-Modul, F: Kraft, b: Breite, f: Frequenz der Grundschwingung, h: Höhe, m: Masse Probekörper, y: Verlagerung, ϵ : Dehnung, σ : Spannung, λ : Schwingungsbewertung (Randbedingung), l_e : Einspannlänge, l_g : Gesamtlänge
Der Elastizitätsmodul (kurz E-Modul) ist definiert als

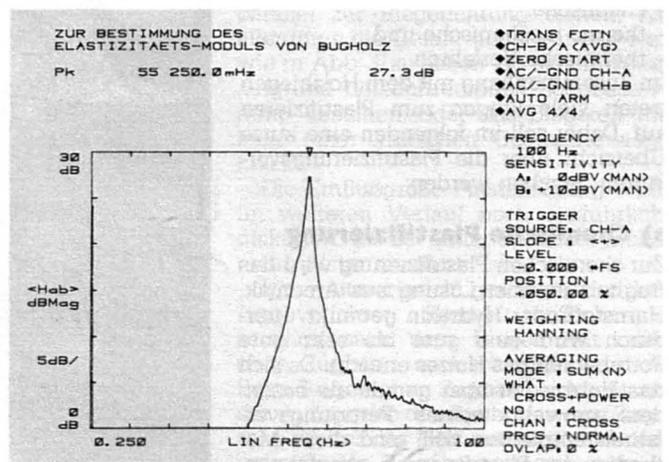
$$E = \sigma / \epsilon \text{ [N/mm}^2\text{]},$$

also als Verhältnis von auftretender Spannung σ , zu Dehnung ϵ . Allgemein wird die prozentuale Abnahme des E-Moduls während des Plastifizierungsvorganges, als Vorbehandlung des Holzes für das Holzbiegen, als ein Indikator für die Plastifizierung angesehen. Für den Einsatzfall Holzbiegen wird dabei stets der Biege-E-Modul betrachtet.

Zur Bestimmung des Biege-E-Moduls stehen sich im wesentlichen zwei Methoden gegenüber, die statische und die dynamische Messung. Bei der statischen Messung wird entsprechend der Gleichung (1) die Verlagerung nach aufgebrachtener Kraft gemessen und daraus der E-Modul berechnet.

$$E = \frac{4 \cdot F \cdot l_e^3}{b \cdot h^3 \cdot y} \tag{1}$$

Abb. 5: Bildschirmanzeige des FFT-Analysators mit Transfer-Funktion und Grundschwingung bei 55,25 Hz



Bei der dynamischen Messung des E-Moduls wird der Biegestab zu meßbaren Schwingungen angeregt. Die Schwingungen werden untersucht, wobei es zur Bestimmung des E-Moduls ausreicht, die niedrigste (erste) Eigenfrequenz, auch Grundschwingung genannt, zu ermitteln. Aus ihr wird mit Hilfe folgender Gleichung (2) der E-Modul berechnet:

$$E = \frac{48 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m \cdot l_e^4}{b \cdot h^3 \cdot l_g \cdot \lambda^4} \quad (2)$$

Die Bestimmung der Grundfrequenz kann auf vielfältige Art geschehen. Methoden hierzu wurden unter anderem von Mehlhorn und Merkel [12] sowie Kollmann und Krech [13] angeboten. Im folgenden Versuch wird der dynamische E-Modul mit Hilfe eines FFT-Analysators (FFT: Fast-Fourier-Transformation) bestimmt.

Versuchsaufbau

Zur Bestimmung des Biege-E-Moduls an einem Holzstab wird der Probekörper einseitig in eine Schnellspanvorrichtung eingespannt. Ein Piezo-Beschleunigungsaufnehmer wird auf dem Stab angebracht und das System durch einen Hammer mit integriertem Piezo-Kraftaufnehmer angeregt (Abb 4). Beide Signale werden durch den FFT-Analysator ausgewertet, der augenblicklich die Transfer-Funktion mit der entsprechenden Grundschwingung anzeigt (Peak) (Abb. 5). Dieser Vorgang wird insgesamt viermal durchgeführt, wobei der FFT-Analysator ständig mittelt. Es hat sich gezeigt, daß Meßreihen mit acht oder 16 Mittelungen das Ergebnis nicht mehr verändern.

Durch die Masse des Beschleunigungsaufnehmers wird das Meßergebnis zwar systematisch verfälscht, allerdings vernachlässigbar klein. Zur Sicherheit wurden die ermittelten dynamischen E-Modul-Werte stichprobenartig durch statische Messungen überprüft. Es zeigten sich bei ebenfalls einseitiger Einspannung mit Hilfe der Gleichung (1) Abweichungen von weniger als 4 %. Weiterhin wurde bei allen Berechnungen der Schubmodul G vernachlässigt.

Die Plastifizierung und damit der E-Modul hängt wesentlich von Temperatur und Feuchtegehalt des Holzes ab. Der Feuchtegehalt wird durch Wiegen und Vergleich mit Darrproben gemessen.

Die Temperatur wird auf zwei Arten bestimmt: Die Oberflächentemperatur wird durch ein Heimann-Strahlungspyrometer ermittelt, das seinerseits die Abstrahlung infraroter Strahlen eines zu messenden Objektes mißt. Da Holz einen sehr günstigen Strahlungsbeiwert von etwa 0,95 hat, ist diese Messung sehr exakt. Der Idealfall, ein sogenannter schwarzer Strahler, hat einen Strahlungsbeiwert von 1. Der besondere Vorteil der pyrometrischen Messung ist,

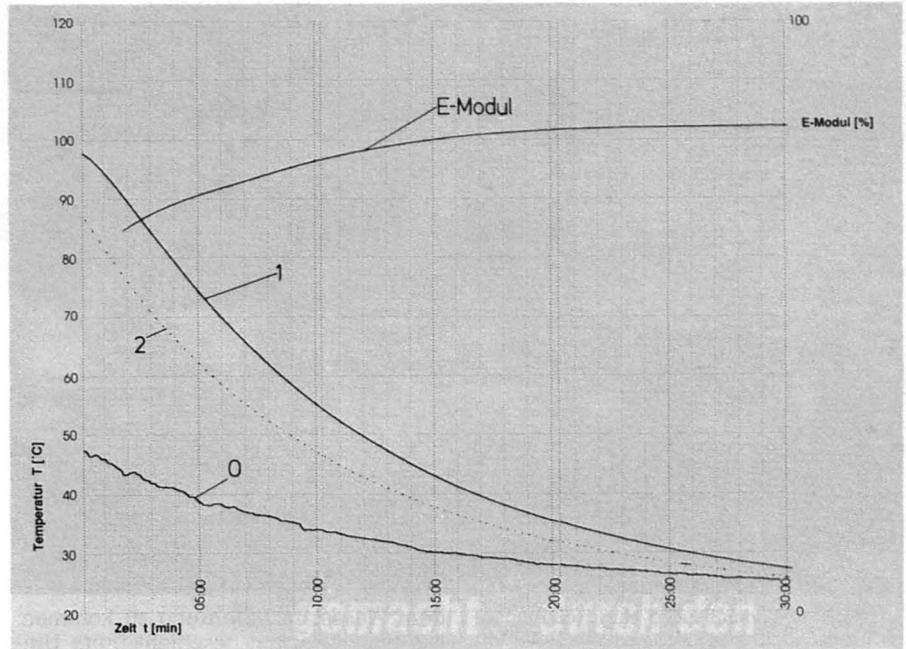


Abb. 7: Typische Abkühlkurve mit Änderung des E-Moduls über die Zeit für dampfplastifizierte Hölzer. Plastifizierungszeit etwa 1 min/mm Holzdicke.

daß absolut keine Beeinflussung der tatsächlichen Temperatur durch den Meßaufnehmer stattfindet.

Im Inneren der Probekörper wird bei Eindringtiefen von 8 mm und 16 mm die Temperatur mittels feiner Thermo-elemente (NiCr-Ni, 0,5 mm dick) gemessen. Dort spielt die Beeinflussung der gemessenen Temperatur durch das Thermoelement aber keine so große Rolle wie an der Oberfläche. Diese Anordnung ist ebenfalls Abb. 4 zu entnehmen.

Durchführung der Versuche

Für die vorliegende erste Untersuchung wurde nur Holz der Rotbuche (*fagus silvatica*) verwendet. Zunächst wurde das Versuchsholz auf einen quadratischen, prismatischen Querschnitt (Querschnitt über die gesamte Werkstücklänge konstant) gehobelt und auf gleiche Länge

zugeschnitten. Die Kanthölzer wurden optisch geprüft, wobei alle Hölzer mit Astansätzen oder sonstigen Inhomogenitätsstellen aussortiert wurden. Jedes einzelne Holz wurde gewogen, vermessen und bezeichnet.

Die vorbereiteten Hölzer wurden zunächst aufgrund ihrer Anisotropie in drei Gruppen eingeteilt:

1. In der ersten Gruppe sind alle Hölzer zusammengefaßt, deren Jahresringe

Abb. 8: Typische Abkühlkurve mit Änderung des E-Moduls über die Zeit für hochfrequenz-plastifizierte Hölzer, wobei t = 2:30 min, Anfangsfeuchte u ~ 25 % (Bildnachweis: IfW, [8])

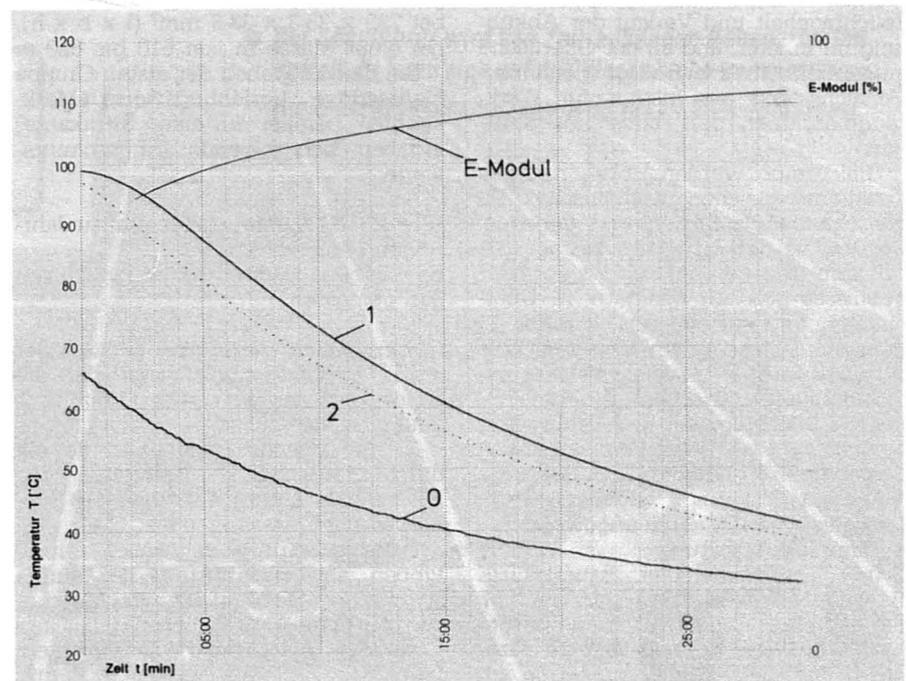




Abb. 6: Versuchstand zum Holzbiegen an der Universität Stuttgart mit Behälter zur Dampfplastifizierung (links), Biegemaschine (Mitte), HF-Generator mit angeflanschter Plastifiziereinheit (dahinter) sowie E-Modul-Prüfstand (rechts) mit FFT-Analysator.

- annähernd parallel zu einer Stirnkante verlaufen, mit $\alpha_{max} = 5^\circ$
- Die zweite Gruppe umfaßt alle Stäbe, deren Jahr- beziehungsweise Markstrahlen in einem Winkel α von 40 bis 45° zu den Stirnkanten liegen.
 - In der dritten Gruppe sind alle übri- gen Kanthölzer zusammengefaßt.
- Für jedes Holz wurde der dynamische Biege-E-Modul zweifach bestimmt; nach der ersten Meßreihe wurde der Stab in seiner Längsachse um 90° gedreht und die Messung wiederholt.

Im zweiten Versuchsabschnitt wurden hinsichtlich Dichte und E-Modul ausgewählte Hölzer unterschiedlich plastifiziert und daran anschließend über 30 Minuten Abkühlzeit gemessen. Es wurden Kurven für E-Modul-Verlauf, Feuchtegehalt und Verlauf der Abkühlung im Inneren und an der Oberfläche aufgezeichnet. Abb. 6 zeigt hierzu den Versuchstand am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart.

Gleichzeitig wurden Hölzer mit den annähernd gleichen mechanischen Eigenschaften plastifiziert und gebogen. Der Radius der Biegeform beträgt $r = 170$ mm. Die Beurteilung des Biegeergebnisses geschah qualitativ in Übereinstimmung mit den von Vorreiter [9] genannten Biegefehlern. Es wurde eine Aussage darüber erwartet, welcher Zusammenhang zwischen E-Modul-Abnahme, Feuchtegehalt und Temperatur einerseits sowie einem einwandfreien Biegeergebnis andererseits besteht.

Zur Plastifizierung wurden zwei unterschiedliche Verfahren angewendet:

- Dampfplastifizierung**
Im Plastifizierbehälter, Bauart GHE Bavaria, befindet sich ein Wassersumpf, der mittels Heizelement sprudelnd gekocht wird. Das Bugholz liegt im darüber befindlichen Dampfraum, ohne mit

dem Wasser in Berührung zu kommen. Die Plastifizierung geschieht unter Umgebungsdruck.

2. Hochfrequenzplastifizierung

Ein Kunststoffrohr befindet sich zwischen den beiden Elektroden, die von einem Hochfrequenz-Generator, Bauart Himmel-Werk, mit 6 kW Ausgangsleistung gespeist werden. Das Kunststoffrohr ist einseitig offen, damit kein Überdruck durch erhitzten Dampf entstehen kann. Der HF-Generator arbeitet bei einer Frequenz von 27,12 MHz.

Die Plastifiziereinheit lehnt sich an ein Patent [14] aus dem Jahr 1984 an, allerdings wird weder im geschlossenen Dampfraum plastifiziert noch Dampf von außen zugesetzt. Ein ähnliches Verfahren wird auch an anderer Stelle [15] beschrieben.

Versuchsergebnisse 1. Der Biege-E-Modul von unplastifiziertem Holz

Es wurden 85 Proben jeweils doppelt gemessen. Die Probenabmessungen lagen bei $739 \times 33,3 \times 33,3$ mm³ ($l \times b \times h$), bei einer Masse m von 510 bis 620 g.

Bei den 23 Proben der ersten Gruppe (Jahresringe beziehungsweise Markstrahlen parallel zu einer Stirnkante) ergaben sich folgende Durchschnittswerte:

$E_t = 11\ 600$ N/mm² (tangential zu Jahresringen gemessen)

$E_r = 11\ 400$ N/mm² (radial zu Jahresringen gemessen)

In Einzelfällen war E_r aber auch größer als E_t . Es ist bemerkenswert, daß die Anisotropie des Werkstoffes Holz nicht deutlicher hervortritt.

In der zweiten Gruppe wurde ein durchschnittlicher E-Modul von $E = 11\ 150$ N/mm² errechnet (18 Proben, je zwei Messungen).

Die dritte Gruppe zeigte sich mit 40 Proben am mächtigsten. Ihr durchschnittlicher E-Modul aus zwei Messungen lag bei $E = 10\ 650$ N/mm².

Bei allen Proben lag die Holzfeuchte u bei 10 bis 12 %; die Darrwichte betrug

im Durchschnitt $\rho_D = 610$ kg/m³. Insgesamt ergab sich ein durchschnittlicher E-Modul von $E = 11\ 000$ N/mm²

Abnahme des Biege-E-Moduls durch Plastifizierung

Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Ergebnisse wurden für die folgende Versuchsreihe nur Hölzer ausgewählt, die in Dichte und E-Modul sehr nahe an den Ergebnissen des Durchschnittes lagen.

Ein Teil dieser Hölzer wurde mit Naßdampf, wie oben beschrieben, mit unterschiedlichen Dämpfzeiten plastifiziert. Bei der Hälfte dieser Hölzer wurde der E-Modul über der Abkühlungskurve bestimmt, die andere Hälfte wurde gebogen, um so eine Aussage über die Biegefähigkeit zu erhalten.

Es zeigte sich, daß nach 30 Minuten die Hölzer bereits einwandfrei gebogen werden konnten. Dies entspricht einer Plastifizierungszeit von etwa 1 min/mm. In dieser Zeit nahm der E-Modul um über 35 % ab. Die E-Modul-Abnahme für längere Plastifizierungszeiten lag bei etwa 4 % je weitere zehn Minuten.

Bei der Plastifizierung und den nachfolgenden Messungen ergaben sich folgende Schaubilder (Abb. 7 und 8). Es bedeuten: E: Prozentuale Änderung des E-Moduls über die Zeit, wobei $E=100\%$ der E-Modul des unplastifizierten Holzes ist. 1: Abkühlkurve über der Zeit, wobei im Inneren des Kantholzes gemessen wird. Querschnitt (bei $u \sim 11\%$) $\sim 33,3 \cdot 33,3$ mm², Eindringtiefe des Thermoelementes ~ 16 mm. 2: Wie 1, jedoch Eindringtiefe ~ 8 mm. 0: Pyrometrische Messung der Oberflächentemperatur.

Sowohl für Dampf- als auch für HF-plastifizierte Hölzer gilt, daß die Trocknungskurve qualitativ der Abkühlungskurve 2 gleicht. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde sie daher nicht dargestellt. Die entsprechenden Werte sind: $u(t_0) = 28\%$, $u(t_{30}) = 23\%$ für Abb. 7 und: $u(t_0) = 23\%$, $u(t_{30}) = 19\%$ für Abb. 8.

In der gleichen Weise wurde mit Hölzern verfahren, die unter Hochfrequenz plastifiziert worden waren. Da alle Hölzer eine Ausgangsfeuchte von 10 bis 12 % hatten, mußten die Proben für HF-Plastifizierung zuvor auf einen Wassergehalt von etwa 25 % gebracht werden. Dies geschah durch Wasserlagerung und anschließender Lagerung in feuchter Umgebung. Die E-Modul-Abnahme lag bei diesen Hölzern bei über 25 %. Es zeigte sich, daß sowohl bei Unter- als auch bei Überschreitung der Plastifizierungszeit von 2:30 min in danach gebogenem Holz Knickfalten auftraten. Weiterhin stieg der Feuchteverlust bei längerer Erwärmung mit Hochfrequenz an.

Beim Vergleich der beiden Kurven fallen folgende Punkte auf:

- Mit HF-plastifizierte Hölzer erreichen an der Oberfläche erheblich höhere Temperaturen.

2. Die Abkühlkurven im Inneren des Holzstabes verlaufen bei Anwendung der Hochfrequenz erheblich gleichmäßiger als bei der Dampfplastifizierung.
3. Der E-Modul sinkt durch die Wasseraufnahme im Dampf stärker als durch die Plastifizierung in HF.
4. Die erzielten Temperaturen im Inneren der Probehölzer sind bei Plastifizierung mit Hochfrequenz oder Dampf annähernd gleich.
5. Je mehr Wasser der Probekörper aufgenommen hat, desto schneller kühlt er ab; schnell abkühlende Probekörper trocknen insgesamt schlechter als langsam abkühlende.

Es überrascht zunächst, daß die HF-plastifizierte Probe an der Außenseite deutlich wärmer ist als das dampfplastifizierte Holz. Eine Erklärung hierfür kann in der gleichmäßigeren Erwärmung durch das hochfrequente Wechselfeld gesehen werden. Damit ist auch der sehr eng beieinander liegende Verlauf der beiden inneren Abkühlkurven der HF-Probe erklärt. Weiterhin kann die Ursache der geringeren Oberflächentemperatur des dampfplastifizierten Holzes auch in der anfänglich sehr viel stärkeren Verdunstung gesehen werden. Es erstaunt aber, daß die Maximaltemperatur im Inneren der dampfplastifizierten Probe nur unwesentlich unter der der HF-Probe liegt.

Die niedrigere E-Modul-Abnahme des mit HF-plastifizierten Holzes ist wahrscheinlich vor allem durch die geringere Wasseraufnahme der HF-Probe begründet.

Die nur qualitativ beurteilten Biegeproben zeigten sich sehr empfindlich (Biegefehler) sowohl gegen Unter- als auch Überschreiten der Plastifizierungszeit bei der Anwendung von Hochfrequenz. Ebenso konnte eine Empfindlichkeit aufgrund eines zu geringen Wassergehaltes festgestellt werden. Hier sind Ansätze gegeben, die Plastifizierung durch Hochfrequenz zu verbessern. Auch wurde beobachtet, daß mit HF-plastifizierte Biegehölzer bei größerer Wasseraufnahme (längerer Wasserlagerung) die gleichen Vor- und Nachteile (Biegebarkeit, Trocknung) hatten wie konventionell (Wasserdampf) plastifizierte Proben.

Ausblick

Die Plastifizierung mit Hochfrequenz verspricht viele Vorteile: Neben einer deutlich verkürzten Plastifizierungszeit ist besonders das einfachere (und schnellere) Trocknen der Werkstücke zu sehen. Hieraus ergeben sich betriebswirtschaftliche Vorteile hinsichtlich kürzerer Durchlaufzeiten und einer insgesamt flexibleren Fertigung. Darüber hinaus dürfte dieses Verfahren langfristig auch durch geringere Energiekosten interessant sein. Einem breiten Einsatz dieser Technologie stehen aber noch viele offene Fragen entgegen; die vordringlichsten sind: Welches ist die

optimale Ausgangsfeuchte, und wo liegt der günstigste Leistungseinsatz bezogen auf Holzdicke beziehungsweise Querschnitt?

Das Stabilisieren (Trocknen) von Holz mittels Hochfrequenz hat in der Biegetechnik schon Einzug gefunden. Dabei ist der Handlungsaufwand beträchtlich, eine Vereinfachung des Prozeßablaufes erscheint notwendig.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden die allgemeinen Einflußgrößen des Biegens von Voll- beziehungsweise Massivholz aufgezeigt und die unterschiedlichen Plastifizierungsverfahren näher beleuchtet. Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls und seine Bedeutung für das Holzbiegen wurden dargestellt. Dabei zeigte sich, daß die Auswirkung der Anisotropie auf den Biege-E-Modul bei unplastifiziertem Holz gering ist.

Zwei Plastifizierungsverfahren wurden vorgestellt und anhand von Temperaturverlauf und E-Modul-Absenkung miteinander verglichen. Es wurde deutlich, daß sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt beide Verfahren gleichwertig gegenüberstehen, die Plastifizierung durch Hochfrequenz aber noch ein großes Entwicklungspotential beinhaltet.

Literatur

- [1] Stevens, W.C., Turner, N.: Wood Bending Handbook, London: Her Majesty's Stationary Office 1970
- [2] Fessel, F.: Probleme beim Holzbiegen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 9 (1951), H.2, S. 56 ff
- [3] Andes, L.E.: Die Holzbiegerei, Hartleben, Wien 1903, Nachdruck in: Edition Fricke im Müller Verlag, Köln, 1986
- [4] Heisel, U. und Eggert, O.: Stand der Holzbiegetechnik, in: HOB - Die Holzbearbeitung 36 (1989), Heft 7/8
- [5] Kollmann, F.: Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1967
- [6] Teichgräber, R.: Über die Spannungszustände bei der Verformung von Holz und die dadurch geänderten Holzeigenschaften, Diss. Univ. Hamburg 1953
- [7] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Bd. II, Springer-Verlag, Berlin, 1955
- [8] Vorreiter, L.: Holztechnologisches Handbuch Bd. I, Verlag Georg Fromme & Co., Wien, 1949
- [9] Vorreiter, L.: Holztechnologisches Handbuch Bd. II, Verlag Georg Fromme & Co., Wien, 1958
- [10] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Bd. I, Springer, Berlin 1951
- [11] Gefahrt, J.: Temperaturverhalten und mechanische Spannungen im nassen Holz bei Hochfrequenz-

erwärmung, Diss. Univ. München 1960

- [12] Mehlhorn, L. und Merkel, D.: Eine schnelle Methode zur automatischen Bestimmung des Biege-E-Moduls an Holzwerkstoffen, in: Holz als Roh- und Werkstoff 44 (1986)
 - [13] Kollmann, F. und Krech, H.: Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung, in: Holz als Roh- und Werkstoff 18 (1960)
 - [14] Kreidel, M.: Verfahren zur Plastifizierung von Vollholz und Holzwerkstoffen in einem Plastifizierzylinder, Deutsche Offenlegungsschrift DE 3 406 715
 - [15] Norimoto, M. and Gril, J.: Wood Bending Using Microwave Heating, in: Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy 24 (1989), No. 4
- HOB-KENNZIFFER 42