

# Holzbiegen zwischen gestern und morgen

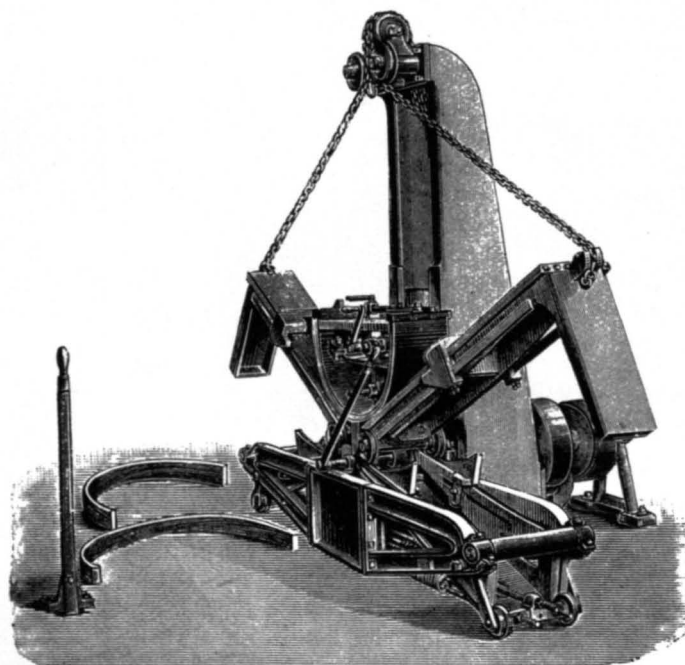
Die Herstellung von gebogenen Hölzern hat eine lange Tradition. Waren es früher Wagner und Kufner bzw. Büttner, die Holz bogen, um daraus Wagenräder oder Holzfässer anzufertigen, so konzentriert sich die Holzbiegerei heute auf die Herstellung von Stühlen. Der folgende Beitrag will dem Leser zunächst einen Überblick der historischen Entwicklung des Holzbiegens geben, ihn dann in das Verfahren einführen, auf spezifische Probleme aufmerksam machen und Möglichkeiten künftiger Entwicklungstendenzen aufzeigen. – Von Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel und Dipl.-Ing. Otto Th. Eggert<sup>1)</sup>.

## Zur Geschichte des Holzbiegens

Holz, von Natur aus in einem bestimmten Bereich elastisch, dient den Menschen schon seit Urzeit als gut bearbeitbarer Werkstoff mit universellem Einsatzbereich. Häuser, Einrichtungsgegenstände, Werkzeuge und Fahrzeuge wurden und werden aus diesem Material hergestellt. Zur Herstellung von Schiffsrümpfen, Holzfässern und nicht zuletzt Wagenrädern standen die Hand-

werker dabei vor der Frage, wie Holz wohl am besten in die gewünschte, gebogene Form zu bringen sei. Unter Zugabe von Wasser bog man die Hölzer über dem offenen Feuer und ließ sie mit der gewünschten Krümmung trocknen. Große Radien konnten auf diese Weise zwar aufwendig, aber mit gutem Ergebnis erzielt werden. Beim Biegen von Rattan wird auch heute noch in etwa nach diesem Verfahren vorgegangen. Radfelgen wurden bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts ausschließlich aus mehreren Holzteilen hergestellt, was hinsichtlich Herstellungsaufwand und Festigkeit sicher alles andere als opti-

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



Holzbiegemaschine von J. A. Fay & Egan Co., Cincinnati.

Abb. 1: Holzbiegemaschine von J. A. Fay & Egan Co., Cincinnati (um 1890) [1]

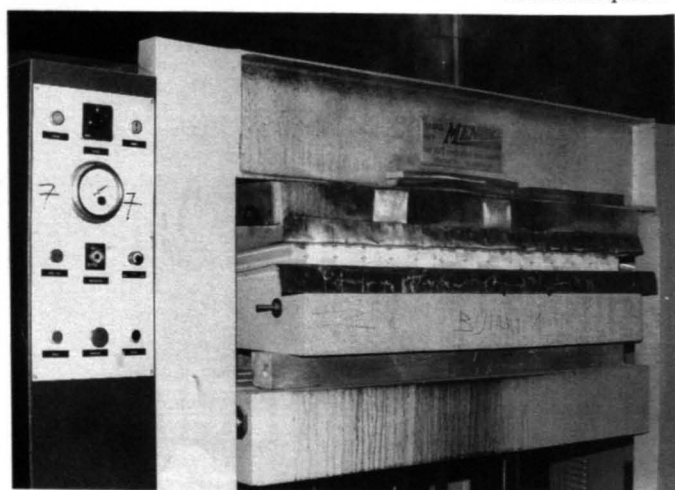
**Wood bending, from the past to the future. – By Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel and Dipl.-Ing. Otto Th. Eggert.**

The production of bent wood has a long tradition. Whereas coach builders and cellarmen or coopers once bent wood to make wagon wheels or wooden barrels, today wood bending is chiefly used in the manufacture of chairs. The following article first sets out to give the reader an overview of the historical development of wood bending, before introducing him to the process, making him aware of specific problems and showing the potential of future development trends.

mal war. Zu diesem Zeitpunkt wurden die ersten Versuche bekannt, ein- oder zweiteilige Radfelgen aus gebogenem Holz herzustellen [1].

Etwa in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts entdeckte der Möbeltischler Michael Thonet, gemeinsam mit seinen Söhnen, das heute nach ihm benannte Verfahren. Thonet, der auf Anraten des damaligen österreichischen Staatskanzlers Fürst Metternich von Boppard am Rhein nach Wien gekommen war, experimentierte zunächst mit in Leim gekochten Furnieren, die er in Metallschablonen trocken ließ. Versuche mit gekochtem Vollholz zeigten, daß der Werkstoff immer nur an der Außenseite aufgrund zu hoher Zugspannungen einriß. Ein Metallzugband, durch das die Dehnung an der Außenseite der Biegung begrenzt werden konnte, brachte den Erfolg. Seither wurden und werden Formteile aller Art aus Holz gebogen, wobei man neben dem Handbiegen, einem sehr anstrengenden Verfahren in feuchtwarmer Umgebung, auch schon vor hundert Jahren Holzbie-

Abb. 2: Holzbiegen mit freier Längung in einer Furnierverleimpressen unter Einsatz von Hochfrequenz



gemaschinen einsetzte, die nach dem Thonet-Prinzip mit Zugband arbeiteten, wie Abb. 1 zeigt.

Ein zweites Verfahren zur Herstellung von Formteilen aus Holz ist das Formverleimen von Lagenhölzern (Furnieren). Es findet etwa seit Mitte der dreißiger Jahre Anwendung in größerer Form [2] und soll an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden, weil es kein Holzbiegen im eigentlichen Sinn (kein Vollholz) darstellt. Bei diesem Verfahren werden die einzelnen Furnierblätter mit Leim getränkt und in einer Form gepreßt. Zur besseren Abbindung des Klebstoffes wurden die Formen in Ein- oder Mehretagenpressen früher hauptsächlich mit Wasser beheizt, wobei sich zu diesem Zweck heute die Anwendung von Hochfrequenz auf breiter Form durchgesetzt hat [3]. Die Hochfrequenzerhitzung und die dabei stattfindende Plastifizierung ermöglichen den Einsatz dieses Verfahrens auch zum Biegen von Vollholz bei freier Längung (Abb. 2).

**Möglichkeiten zum Vollholzbiegen**

Im wesentlichen werden heute folgende Möglichkeiten zum Vollholzbiegen angewendet:

- 1. Holzbiegen mit Zugband (Thonet-Verfahren):
  - 1.1 Handbiegen und
  - 1.2 Maschinenbiegen.
- 2. Holzbiegen bei freier Längung:
  - 2.1 Formpressen.

Die Einsatzgrenzen der einzelnen Verfahren ergeben sich zum einen aus der Kinematik der zur Anwendung kommenden Maschinen bzw. dem möglichen Kraftaufwand beim Handbiegen, zum anderen aufgrund der Formänderungen und der Spannungen beim Biegen.

**Maschinenkinematik**

Die Kinematik kennzeichnet den Bewegungsablauf der Maschine. Holzbiegemaschinen können hierzu derzeit in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden:

- Maschinen für offene Biegungen mit einem maximalen Biegewinkel von bis zu etwa 210° (Abb. 3, 4 und 5) und
- Maschinen für geschlossene Biegun-

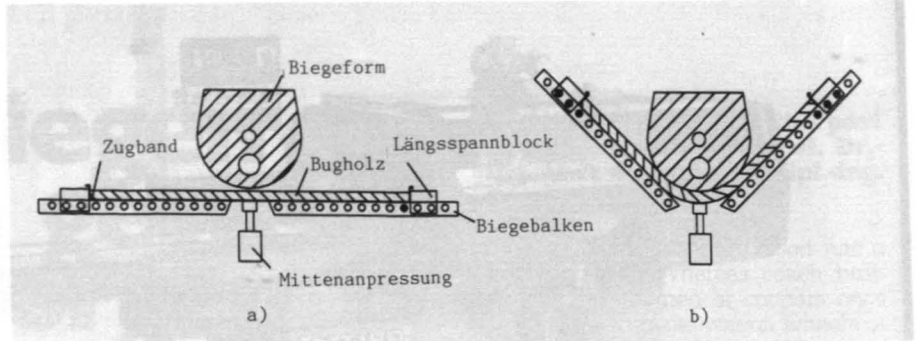


Abb. 3: Funktionsschemata von Holzbiegemaschinen für offene Biegungen. Mit Zugband: a) Startposition, b) Arbeitsstellung.

gen. Da bei diesen Biegemaschinen das Werkstück auf einem Biegeteller aufliegend um eine Form gewickelt wird, sind prinzipiell auch Biegewinkel von weit über 360° möglich (Abb. 6 und 7).

Hinsichtlich des maximalen Biegewinkels kann bei den Biegemaschinen für offene Biegungen unterschieden werden zwischen den Formpressen und den „klassischen“ Biegemaschinen, die mit Zugband arbeiten. Wie im folgenden Abschnitt dargelegt wird, können aufgrund der maximal ertragbaren Spannungen im Werkstück beim Biegen ohne Zugband nur Bögen mit im Verhältnis zum Durchmesser sehr großen Radien erzielt werden. Ferner können Biegemaschinen, bei denen die Form von oben auf die Biegebalken gedrückt wird, bauartbedingt nur Biegewinkel bis etwa 160° erreichen.

**Formänderungen und Spannungen beim Holzbiegen**

Formelzeichen.  $\epsilon_z$ : Bruchdehnung,  $\sigma$ : Spannung,  $d$ : Dicke des Biegeteiles,  $R$ : Krümmungsradius, gemessen bis zur neutralen Faser im Inneren der Biegung (spannungslose Zone),  $r$ : Radius an der Werkstückinnenseite,  $B$ : Biegeverhältnis.

Beim Biegen eines Werkstückes treten allgemein folgende Spannungszustände auf: Auf der Außenseite der Biegung entsteht eine Zugspannung, auf der Innenseite eine Druckspannung, und im Inneren ist eine spannungsfreie Zone (Holz: die neutrale Faser) vorzufinden. Allgemein ist bei einem Werkstoff, der bei einer aufgetragenen Druckbelastung mit einer konstanten Kraft um den gleichen Betrag gestaucht wird, wie er bei einer

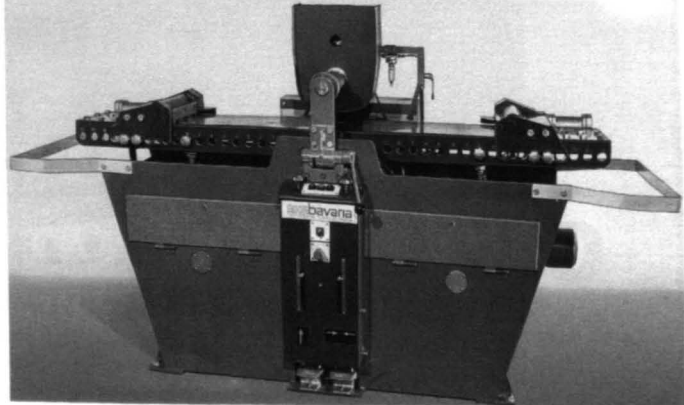
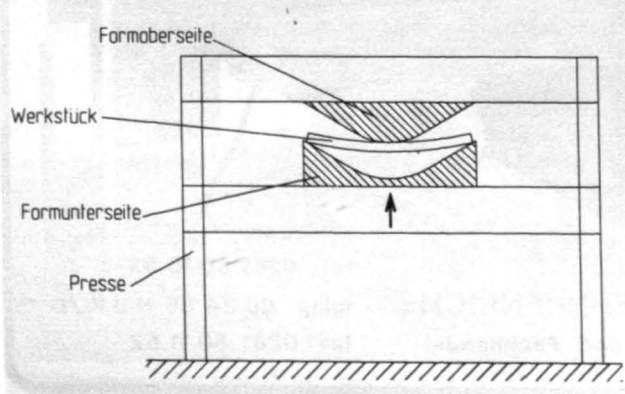
aufgetragenen Zugbelastung mit der gleichen konstanten Kraft gedehnt wird, der Radius der spannungsfreien Zone gleich dem des Flächenschwerpunkts des Querschnitts. Die zerstörungsfreie Biegung eines Werkstückes ist nur dann möglich, wenn folgende Bedingung gilt, die für kreisförmige Biegungen abgeleitet wurde [4]:

$$\epsilon_z \geq d/2R$$

Lufttrockenes Buchenholz läßt sich ohne weitere Vorbehandlung nur sehr eingeschränkt biegen. Man erreicht hier günstigenfalls Werte von  $\epsilon_z = 1\%$ , also von  $d/R = 1/50$ . Zur weiteren Verbesserung der Verformbarkeit bedarf es einer Vorbehandlung, dem Plastifizieren, zum Beispiel durch Dämpfen oder Kochen. Hierdurch steigt  $\epsilon_z$  auf etwa 1,7%. Dies bedeutet, daß Buchenholz bei freier Längung mit etwa  $d/R = 1/30$  gebogen werden kann. Bei stärkeren Verformungen überschreiten die im Biegevorgang auftretenden Zugspannungen den zulässigen Betrag; das Bauteil reißt an der Außenseite ein. Beim Holzbiegen mit Zugband werden diese Spannungen jedoch vom Zugband aufgenommen. Die neutrale Faser befindet sich somit im Bereich der Grenzfläche zwischen Zugband und Bugholzaußenseite. Hierdurch wird ein Biegeverhältnis ( $B = d/r$ ) möglich, das für Buche (*fagus silvatica*) im Bereich von maximal  $d/r = 1,5$  liegt. In diesem Fall gilt etwa:  $d/R = 1/2,5$ . Eine ausführliche Übersicht von Biegeeigenschaften unterschiedlicher Hölzer findet sich hierzu im „Wood Bending Handbook“ [5]. Dort wird aber ein Biegeverhältnis von Buche bei freier Längung

Abb. 4: Funktionsschema einer Formpresse (bei freier Längung)

Abb. 5: Holzbiegemaschine mit Zugband für offene Biegungen



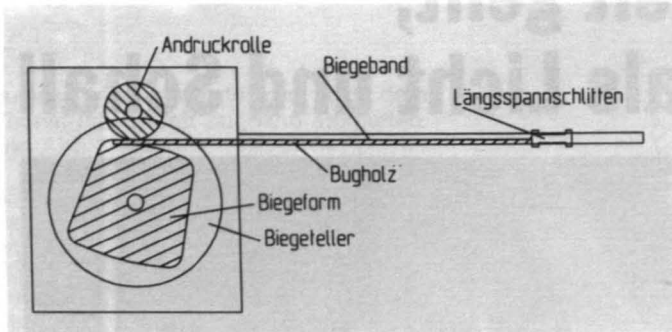


Abb. 6: Funktionsschema einer Rundbiegemaschine

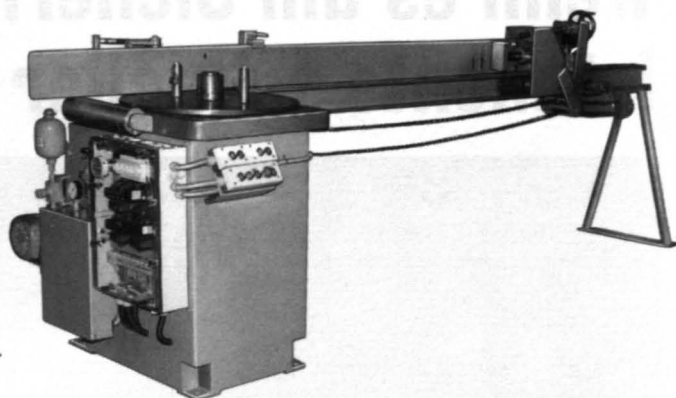


Abb. 7: Rundbiegemaschine

von  $d/r = 1/13$  angegeben, was den Werten von Kollmann [4] aber offensichtlich widerspricht.

### Verfahrensablauf

Beim Holzbiegen werden stets folgende Verfahrensschritte in Reihenfolge durchlaufen:

- Plastifizieren,
- Biegen und
- Stabilisieren.

Die Möglichkeiten zum Biegen wurden bereits im vorangestellten Abschnitt diskutiert. Da die Holz Auswahl beim Biegen von großer Wichtigkeit ist, seien Aspekte hierzu nachfolgend ebenfalls erwähnt.

### Plastifizierung

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits erwähnt, bedarf es, um Holz biegen zu können, der Plastifizierung (Überführung von Holz in einen plastisch verformbaren Zustand). Hierzu stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die wie folgt eingeteilt werden können:

- chemische,
- thermo-mechanische und
- hygrothermische Plastifizierung.

Zur chemischen Plastifizierung wird das Bugholz in einer Lösung aus Ammoniak, Harnstoff oder Hydrazin getränkt. Aufgrund der Toxizität und der aus dem Einsatz der chemischen Plastifizierungsverfahren entstehenden Umweltbelastung ist dem Verfasser kein Einsatz dieser Verfahren bekannt. Zudem entstehen hierbei Verfärbungen im Holz.

Die thermo-mechanische Plastifizierung wird zur Herstellung des sogenannten Stauchbiegeholzes (Gesellschaft für Holzveredelung, Selters) angewendet. Das Holz wird hierbei gedämpft und gestaucht, wodurch es später ab einer bestimmten Feuchte ( $u \sim 15\%$ ) sehr gut formbar ist [6]. Stauchbiegeholz, das im Gegensatz zu konventionell gebogenem Holz nicht mehr dessen Festigkeit erreicht, eignet sich gut für Umleimer und Zierleisten.

Bei der hygrothermischen Plastifizierung wird dem luftgetrockneten Holz Wasser und Wärme zugeführt. Im wesentlichen stehen sich hierzu derzeit folgende Verfahren gegenüber:

- Kochen,
- Dämpfen und
- dielektrische Erwärmung.

Beim Kochen wird das im etwa  $90^\circ\text{C}$

heißen Wasser untergetauchte Holz erwärmt und unter hoher Wasseraufnahme aufgeweicht. Pro mm Holzdicke ist eine Koch- und Tauchdauer von ca. 1 bis 1,5 min erforderlich [7]. Bei Anwendung dieses Verfahrens ist nach dem Biegen eine sehr aufwendige Trocknung erforderlich. Auch muß wegen der im Kochvorgang ausgewaschenen Lignin-Anteile das Wasser häufig ausgetauscht werden, um Verfärbungen zu vermeiden.

Als relativ einfaches und unkritisches Plastifizierungsverfahren gilt das Dämpfen von Holz. Das Werkstück wird hierbei günstigerweise einer Satt dampf-atmosphäre ausgesetzt, die ein optimales Verhältnis von Erwärmung und Wasseraufnahme ermöglicht. Allerdings werden hierzu unterschiedliche Angaben gemacht: Sowohl Fessel [8] als auch Stevens & Turner [5] empfehlen eine Plastifizierung ohne Überdruck (entsprechend einer Dampftemperatur von  $100^\circ\text{C}$ ). Dem steht die Aussage Kollmanns [9] gegenüber, der gespannten Dampf bei  $p_{e, \max} = 0,2 \text{ MPa}$  ( $p_e$ : Überdruck,  $0,1 \text{ MPa}$  entspricht 1 bar) als wesentlich wirksamer ansieht. Grundsätzlich ist aber bei der Dampfplastifizierung darauf zu achten, daß Naß- oder Satt dampf verwendet werden. Eine

Abb. 8: Biegefehler: Vorzeitig ausgespanntes Biegeteil reißt an der Außenseite ein



auch nur geringe Überschreitung der Satt dampf linie bewirkt, daß das Holz getrocknet wird und versprödet.

Bei der dielektrischen Erwärmung werden elektrisch nicht leitende Werkstoffe mittels elektromagnetischer Strahlung (im allgemeinen Hochfrequenz (HF), 13,56 MHz bzw. 27,12 MHz oder Mikrowelle, 2,45 GHz) erwärmt. Im Holz werden dabei die Wasseranteile durch das hochfrequente Wechselfeld zu Schwingungen angeregt, wodurch Reibung und damit Wärme entsteht. Diese Wasseranteile gehen in den dampfförmigen Zustand über und treten aus dem Holz aus. Als Folge trockenet Holz unter Einfluß hochfrequenter Strahlung sehr schnell. In der Regel wird daher dem zunächst luftgetrockneten Holz vor der HF-Plastifizierung Feuchte durch kontrollierte Wasserlagerung zugeführt [10]. Wichtig bei diesem Verfahren ist, das Holz vor Austrocknung und damit Versprödung während des Plastifizierens zu schützen.

### Stabilisierung

Unter Stabilisierung versteht man die Trocknung eines Biegeteils in Formzwangslage. Hierzu bleiben die Biegehölzer im Biegeband (Maschinenbiegen) oder in der Biegeform (Handbiegen) bis zum Erkalten auf Raumtemperatur geklammert. Die Eigenspannungen im Holz werden dabei mit fortschreitender Trocknung und Abkühlung herabgesetzt. Dabei ist zu beachten, daß bei vorzeitiger Lösung der Form noch bestehende Druck-Eigenspannungen so groß sind, daß sie das ursprünglich einwandfreie Biegeteil an der Außenseite zum Einreißen bringen, wie in Abb. 8 zu sehen. Nach dem Erkalten kann das Holz in einem Spannrahmen technisch getrocknet werden. Bei hochwertigen Biegeteilen und schnellen Durchlaufzeiten wird teilweise auch in Formpressen mit Hochfrequenz getrocknet. Dem Nachteil des nicht unbeträchtlichen Maschinen- und Anlagenaufwandes stehen die Vorteile der mit anderen Verfahren kaum erreichbaren Verzugsfreiheit und der hohen Trocknungsgeschwindigkeit (Richtwert etwa ein bis drei Minuten pro mm Holzdicke) gegenüber.

### Holzauswahl

Wie aus den umfangreichen Untersuchungen von Stevens & Turner [5] her-

vorgeht, lassen sich nahezu alle bekannten Holzarten biegen. Durch den unterschiedlichen Aufbau der einzelnen Hölzer und die dementsprechend unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften ergeben sich aber auch unterschiedliche Biegeeigenschaften. Sie drücken sich im bereits erwähnten Biegeverhältnis  $B = d/r$  aus. Eigene, bisher unveröffentlichte Untersuchungen zeigen, daß der Elastizitätsmodul

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

also das Verhältnis von Spannung  $\sigma$  zu Dehnung  $\epsilon$  im astfreien Bereich eines Baumstammes (hier: Buche) bereits eine Streuung von mehr als 30% hat. Generell gilt aber, daß sich möglichst gleichmäßig gewachsenes, langfaseriges Holz mit nur geringen Unterschieden von Früh- zu Spätholz zum Biegen am besten eignet [8]. Andererseits sind Hölzer mit Inhomogenitätsstellen (Astansätzen) nicht zwangsweise zum Biegen ungeeignet, wie Abb. 9 zeigt. Daneben können aber auch vor dem Biegen die als einwandfrei eingestufteten Hölzer einreißen, wie in Abb. 10 zu sehen ist. Eine moderne Biegemaschine mit exakter Längsspannung und gleichmäßigem Biegeablauf hilft, zusammen mit einer ordnungsgemäßen Plastifizierung, einen Teil der Biegefehler zu vermeiden. Aufgrund des noch verhältnismäßig günstigen Preises in Verbindung mit den guten mechanischen Eigenschaften wird zum Biegen im allgemeinen Rotbuchenholz (*fagus silvatica*) bevorzugt. Wegen der homogeneren Struktur eignen sich Laubhölzer besser zum Biegen als Nadelhölzer [11].

**Entwicklungstendenzen**

Wie bereits dargestellt, bestehen derzeit noch verschiedene Problemkreise:

1. Dampf-Plastifizierung: Welches sind die optimalen Druck- und Temperaturverhältnisse für die Plastifizierung mit Wasserdampf?

2. Dielektrische Plastifizierung: Als eindeutiger Vorteil wird stets die Tatsache herausgestellt, daß während der dielektrischen Plastifizierung (HF, Mikrowelle) keine Wasseraufnahme stattfindet, somit der Trocknungsprozeß einfacher gehalten werden könnte. Dieser Argumentation steht gegenüber, daß vor der Plastifizierung eine Wasserlagerung durchgeführt werden muß, bei der das Holz etwa gleichviel Wasser aufnimmt wie bei der Dampfplastifizierung. Auch hier bedeutet weniger Wasser im Holz eine schlechtere Plastizität [12].

Beide Plastifizierungsverfahren führen zu Fragen, welche Wechselwirkungen bestehen zwischen Holzfeuchte und Temperatur, und wie sind deren Auswirkungen auf das Holzbiegen.

3. Biegen: Wie aufgezeigt, stehen sich beim Holzbiegen zwei Verfahren gegenüber: das Biegen mit Zugband und das Biegen bei freier Längung. Unzureichend untersucht wurden folgende Problemkreise: Wie groß ist das Biegeverhältnis mit Zugband bei freier Längung?



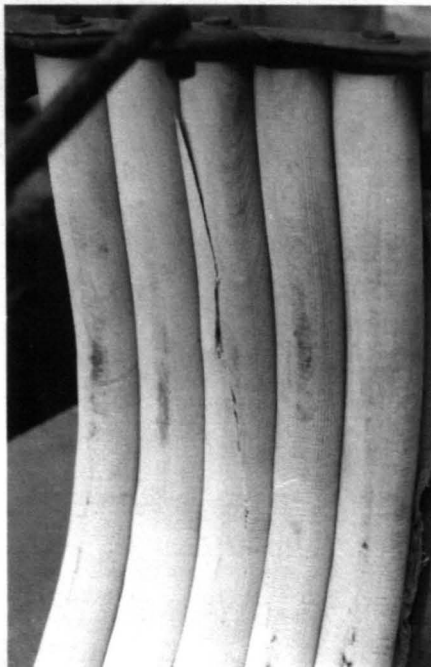
Abb. 9: Einwandfreies Biegeergebnis trotz zweier Astansätze

Welche maximal ertragbaren Spannungen treten dann im Werkstück während des Biegens und danach in der Stabilisierungsphase auf? Welche verfahrensabhängigen Wechselwirkungen bestehen zwischen dem Biegeverhältnis und der Biegeschwindigkeit? Wo ist die optimale Lage der neutralen Faser? Wie lassen sich künftig maschinell Bughölzer herstellen, die heute noch manuell gebogen werden?

4. Stabilisierung: Welche Spannungen treten im Werkstück während der Stabilisierungsphase auf? Wie können diese Spannungen für die gewollte Verformung gezielt genutzt werden?

Obwohl Holzbiegen eines der ersten Verfahren der industriellen Produktion

Abb. 10: Auch bei als gut angesehenen Hölzern können Biegefehler auftreten (Bildnachweis: [1], GHE bavaria, Verfasser)



war und in den Jahren zwischen 1930 und 1960 eine heute kaum mehr nachvollziehbare Bedeutung hatte, stehen noch viele Fragen offen. Diese Fragen sind im Umfeld der heutigen Zeit zu sehen: Zum einen ermöglicht eine ausgefeilte Meßtechnik heute Untersuchungen, die vor noch wenigen Jahren nicht denkbar waren. Zum anderen wurden Bughölzer häufig durch Polymerwerkstoffe ersetzt, deren Eigenschaften oftmals sogar schlechter sind als die von Bugholz, über deren Umweltbelastung bei Produktion und Entsorgung man aber so langsam erst beginnt, nachzudenken. Gerade die Rückbesinnung auf abfallarme, ressourcenschonende Technologien (Holz ist ein nachwachsender Rohstoff) verleiht dem Holzbiegen neue Attraktivität.

**Literatur**

[1] Andes, L. E.: Die Holzbiegerei. Wien: Hartleben 1903. Nachdruck. Edition Fricke, Köln: Rudolf Müller Verlag 1986.  
 [2] Kollmann, F.: Herstellung von geformten Sperrholz- und Schichtholzteilen. Holz als Roh- und Werkstoff 9 (1951) 11, S. 416-422.  
 [3] Heisel, U. und Eggert, O.: Stand der Holzbiegetechnik. HOB 36 (1989) 7/8, S. 36-40.  
 [4] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Bd. II. Berlin: Springer 1955.  
 [5] Stevens, W. C., & Turner, N.: Wood Bending Handbook. London: Her Majesty's Stationary Office 1970.  
 [6] Kollmann, F.: Über das Biegen der Hölzer. Holz-Zentralblatt 78 (1952) 104, S. 1439-1440 und 105, S. 1452-1453.  
 [7] Vorreiter, L.: Holztechnologisches Handbuch. Bd. II. Wien: Georg Fromme & Co. 1958.  
 [8] Fessel, F.: Probleme beim Holzbiegen. Holz als Roh- und Werkstoff 9 (1951) 2, S. 56-62.  
 [9] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Bd. I. Berlin: Springer 1951.  
 [10] Norimoto, M.: Wood-bending by Microwaves. Wood Research Review 14 (1979), S. 13-26.  
 [11] Norimoto, M., and Gril, J.: Wood Bending Using Microwave Heating. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy 24 (1989) 4, S. 203-212.  
 [12] Heisel U., und Eggert, O.: Plastifizierung von Bugholz mit Hochfrequenz oder Wasserdampf. HOB 37 (1990) 9, S. 18-26.

HOB-KENNZIFFER ..... 78

**HOB 6/91,  
Ausgabe zur  
Fensterbau '91,  
Stuttgart**