

Die Herstellung gebogener Holzteile hat eine lange Tradition: Schiffsrümpfe, Holzfässer und Wagenräder wurden schon vor langer Zeit gebogen. Aus dem Wunsch heraus, auch Stuhlteile über ein bestimmtes Maß hinaus zu biegen, entwickelte der Bopparder Tischlermeister Michael Thonet vor etwa 150 Jahren schließlich das, was heute im allgemeinen unter Holzbiegen verstanden wird, nämlich das Formen von Vollholzteilen mit einem Zugband, das die Längung und damit das Einreißen der Außenseite des Werkstückes praktisch verhindert.

## Holzbiegen

Ein umweltfreundliches altes und zugleich modernes Produktionsverfahren

Von Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Uwe Heisel und Dipl.-Ing. Otto Eggert, Stuttgart \*

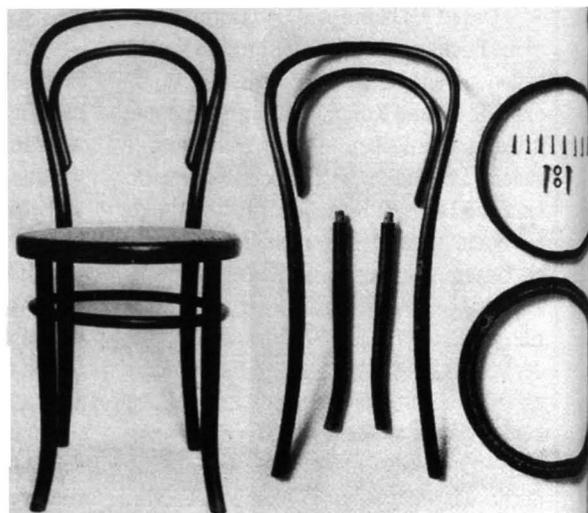


Abb. 1 Thonet-Stuhl Nr. 14 und seine Einzelteile (Werkfoto: Thonet)

Vor dem Biegen von Vollholz mittels Zugband versuchte Thonet jedoch zunächst Furniere in Leim zu kochen und hieraus Biegeteile herzustellen. Wegen der damals noch geringen Festigkeit der Leimverbindungen gab er dieses Vorhaben aber auf, und wandte sich dem Vollholz zu.

Als bisherige Blütezeit der Holzbiegerei kann die Zeit des II. Weltkrieges angesehen werden. Die verhältnismäßig hohe Festigkeit von Holzteilen bei vergleichsweise geringem Gewicht führte vor allem zum Einsatz von sogenannten Bugholzteilen im Flugzeugbau. Daneben wurden bis vor etwa zehn, zwanzig Jahren noch in weiten Bereichen gebogene Holzformteile eingesetzt. Beispiele hierzu sind Kofferrahmen, Tennisschläger oder Ski.

### Einsatz von Bugholzteilen

Dank der modernen Werkstofftechnik wurden zwar etliche Bugholzteile durch leichte und hochfeste Stahl- bzw. Kunststoffteile ersetzt, der natürliche Werkstoff Holz konnte sich aber auf verschiedenen Gebieten behaupten. Bis vor etwa einem Jahr war die Holzbiegerei eigentlich nur noch eine Sache der Stuhlhersteller. Hier hatte und hat das Holzbiegen Bestand, weil leichte, hoch be-

anspruchbare und gut haltbare Stühle mit einem günstigen Materialeinsatz gefertigt werden können. Daneben ergeben sich für die Möbeldesigner gerade durch den Einsatz dieses Verfahrens Freiheitsgrade, die mit anderen Mitteln bei diesem Werkstoff so nicht erreicht werden können. Als Beispiel soll hier das Produktionsprogramm der Gebr. Thonet, Frankenberg, genannt werden, deren Stuhl Nr. 14 oder sein moderner Nachfolger Nr. 214 sicher bekannt ist sein dürfte (Abb. 1).

Seit kurzer Zeit ist es auch wieder in Mode gekommen, kommerziell Wein in Eichenfässern nach einem bestimmten Verfahren zu keltern. Das besondere an diesem „Barrique“ ist, daß er durch die Vergärung in einem innen unbehandelten Faß einen ganz typischen Eichengeschmack bekommt. Hierfür werden verhältnismäßig kleine Fässer mit einem Volumen von 100 l oder 200 l verwendet.

Mit dieser Produktionsmethode wurde auch das Holzfaß wiederentdeckt, womit zwangsläufig auch eine Wiederentdeckung des dazu nötigen Fertigungsverfahrens zur Faßherstellung, des Holzbiegens, einhergeht. Dabei mag der Aspekt, daß ein Faß zur „Barrique“-Herstellung nur einmal verwendet werden kann, für den Produktionstechniker auf der Suche nach neuen Märkten schon interessant sein.

Neben den genannten Einsatzmöglichkeiten des Holzbiegens sind noch Kufen für Rodelschlitten oder Schaukelstühle und

-pferde zu nennen. Dem Einsatz von Bugholzteilen in Sportgeräten steht in verschiedenen Fällen das fehlende „High-Tech-Image“ wohl mehr im Weg, als die Leistungsfähigkeit bei der tatsächlichen, meist nur durchschnittlichen Beanspruchung durch Freizeitsportler.

### Verfahrensablauf, Werkstoffauswahl

Beim Biegen von Vollholz werden stets drei Verfahrensschritte durchlaufen: Plastifizieren, Biegen und Stabilisieren, (Abb. 2).

#### Plastifizieren

Plastifizieren ist nötig, um den Werkstoff formbar zu machen. In der Regel dämpft man, was bedeutet, daß das Holz einer Satteldampfmasse für eine gewisse Zeit ausgesetzt wird. Dabei nimmt es gleichermaßen Wärme wie Feuchte auf. Während die Wärme gleichmäßig das ganze Holz durchdringt [1], wird die Feuchte nur in den Randzonen aufgenommen, (Abb. 3) [2], wodurch sich auch ein vergleichsweise günstiges Trocknungsverhalten ergibt.

Bei der Plastifizierung in elektromagnetischen Wechselfeldern, zum Beispiel mit Hochfrequenz oder Mikrowellen, werden im allgemeinen die Randzonen ausgetrocknet, obwohl gerade diese die höchsten Verformungen aufzunehmen haben. Hieraus ergibt sich, daß die dielektrische Plastifizie-

\* Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Uwe Heisel ist Direktor und Lehrstuhlinhaber am Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart. Dipl.-Ing. Otto Th. Eggert ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am selben Institut

Abb. 2 Arbeitsschritte beim Holzbiegen und deren Einflußparameter



reißt (Buche plastifiziert etwa 1,6%). Dagegen nimmt der Werkstoff Stauchungen bis zu einer Höhe von etwa 30% auf, und setzt sie in eine Verdichtung der Zellen um. Holz behält im Stauchvorgang seinen Querschnitt demnach bei.

Holz besitzt aber im Unterschied zum idealen Biegeteil aus Abb. 5 unterschiedliche Spannungs-/Dehnungsverhältnisse. Für biegeweich plastifiziertes Holz beträgt die Zugdehnung etwa  $\frac{1}{3}$  der Druckstauchung [4]. Daraus ergibt sich eine Spannungsverteilung, wie sie in Abb. 6 zu sehen ist.

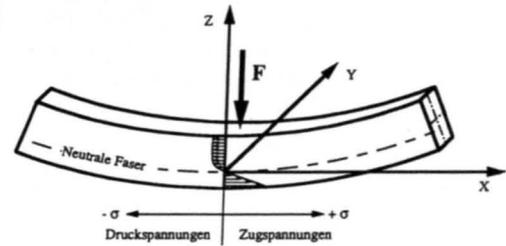


Abb. 6 Spannungsverteilung beim Biegen eines plastifizierten Holzstabes

Bis vor etwa 150 Jahren konnte Holz demnach nur soweit gebogen werden, wie eine Streckung seiner Außenseite ohne einzureißen möglich war. Zur Herstellung von Fässern und Bootsrümpfen war dies sicherlich hinreichend, zur Herstellung von Stüh-

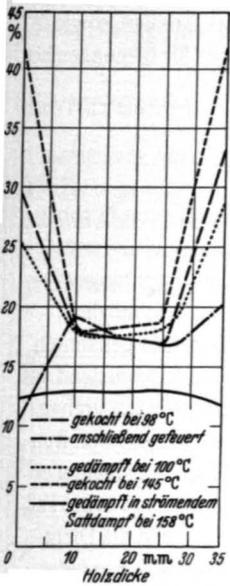


Abb. 3 Feuchteverteilung bei der Dampfplastifizierung [2]

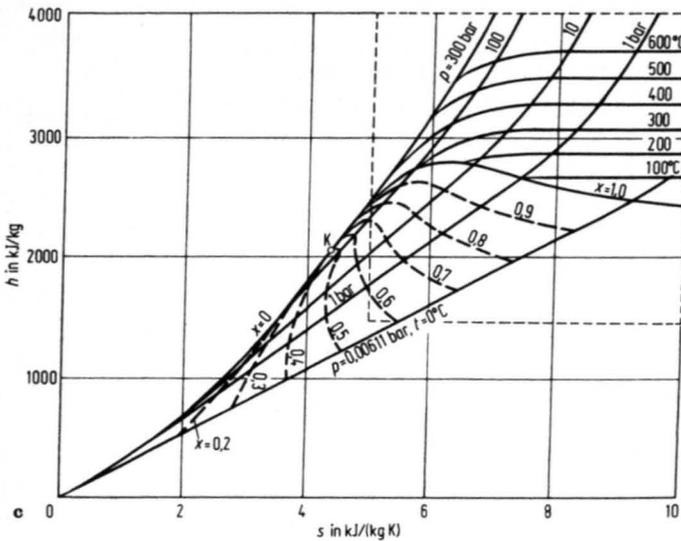


Abb. 4 h,s-Diagramm für Wasserdampf (vereinfacht) [3]

lung alleine trotz einer Vielzahl anderer Vorteile nur für bestimmte Einsatzgebiete in Frage kommt. Sie sollen im weiteren noch erläutert werden. Die Möglichkeit hingegen, geformte Holzteile dielektrisch zu trocknen, kann jedoch in vielen Fällen als schnelle Alternative zu konventionellen Trocknungsverfahren angesehen werden. Auch auf diesen Aspekt wird im weiteren noch eingegangen werden.

In jedem Fall ist aber eine möglichst effiziente Plastifizierung gefragt. Hierbei bestehen zwei Forderungen: möglichst viel Wärme in das Werkstück einbringen zu können und gleichzeitig in den Randzonen des Werkstücks möglichst viel Wasser einzulagern. Eine Lösung bietet die Thermodynamik im h,s-Zustandsdiagramm für Wasserdampf, (Abb. 4). Hier bezeichnet die Linie  $x=1$  den Dampfgehalt von Naßdampf in kg, also wieviel kg Satttdampf sich in 1 kg Naßdampf (Satttdampf und siedende Flüssigkeit) befinden. Die Forderung nach einer optimalen Plastifizierung durch Dampf wird demnach erreicht, wenn  $x=1$  ist. Ein Abweichen von

dieser Linie hat zur Folge, daß sich die Plastifizierungszeiten verlängern, oder der Zustand der Biegebarkeit gar nicht mehr erreicht wird.

### Biegen

Der Biegevorgang dient der Formgebung des Werkstückes. Vergewenärtigt man sich den Ablauf eines Biegevorgangs, so übersieht man schnell die grundsätzliche Problematik, die Streckung der konvexen Seite bei gleichzeitiger Stauchung der konkaven Seite (Abb. 5). Holz läßt aber nur eine minimale Längung seiner Außenseite zu, bevor es

Abb. 5 Spannungsverteilung in einem idealen Biegeteil

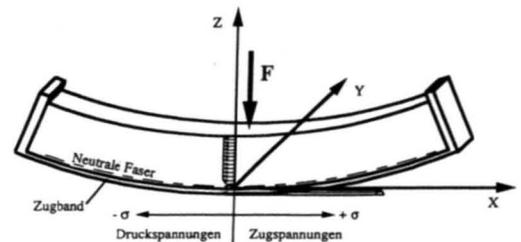
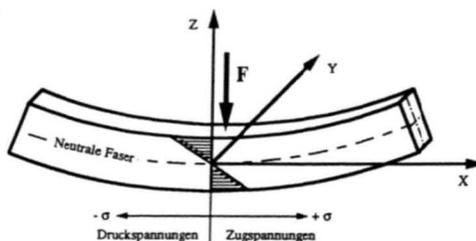


Abb. 7 Spannungsverteilung beim Biegen mit Zugband

aber nicht. Wie bereits eingangs erwähnt, erfand hierzu der Tischlermeister Michael Thonet ein Verfahren, bei dem die Zugspannungen von einem an der Außenseite angelegten Stahlband aufgenommen werden, wodurch im Inneren des Holzes nur noch Druckspannungen auftreten, (Abb. 7). Übrigens verwendete man früher sogenanntes Krummholz (krumm gewachsenes Holz) für enge Biegungen.

### Die Vollholzbiegeverfahren

Aus dem Thonet'schen Verfahren heraus wurden viele andere Verfahren entwickelt,

## Holzbiegen



Abb. 8  
Übersicht der  
Vollholzbiege-  
verfahren [5]

bei denen der Stauchprozeß entweder durch zusätzliche Kräfte während des Biegens oder vor dem Biegevorgang, am ungebogenen Teil, durchgeführt wird (Abb. 8). Alleine das Formpressen und das freie Biegen kommen dabei ohne Stauchkräfte aus. Dafür ist das Verhältnis von Biegeradius zu Dicke des Werkstückes auf etwa 30:1 beschränkt. Der Nachteil der übrigen Verfahren besteht darin, daß sie hinsichtlich Aufwand und Handhabung oder in der Beeinflussung der Werkstoff-Eigenschaften erheblich ungünstiger sind, als das Thonet-Verfahren [5]. Daher konnte sich keines dieser Verfahren bisher langfristig durchsetzen. Die praktischen Möglichkeiten, Biegeteile für einen Stuhl oder ein Holzfaß herzustellen, werden weiter hinten aufgezeigt.

## Stabilisieren

Der abschließende Verfahrensschritt ist das Stabilisieren des Bugholzes. Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften muß das gebogene Holz in Formzwangslage abgekühlt und bis zu einem gewissen Grad auch getrocknet werden, damit Nachbrüche ausgeschlossen werden können. Hierzu bieten sich alle bekannten und am Markt angebotenen Holz Trocknungsverfahren an. Auf die Möglichkeit, die Maßhaltigkeit der Biegeteile durch das Stabilisierungsverfahren mit zu beeinflussen, soll bei der genauen Beschreibung der Biegeverfahren eingegangen werden.

## Werkstoffauswahl

Die Werkstoffauswahl spielt beim Holzbiegen ebenfalls eine Rolle. Bekannt sein dürfte, daß unterschiedliche Holzarten auch unterschiedliche mechanische Eigenschaften haben. Allerdings sind sich die Experten nicht einig, ob bei gleicher Holzart bestimmte Wuchsgebiete anderen stets vorzuziehen sind. Grundsätzlich läßt sich aber sagen, daß Harthölzer gut biegsam sind, während Weichhölzer hier etwas kritischer sind. Eine ausführliche Dokumentation zu den unterschiedlichen Biegeeigenschaften findet sich im „Wood Bending Handbook“ von Stevens & Turner [6]. Untersuchungen, in wie weit die Biegeeigenschaften der Nadelhölzer durch die Plastifizierung verbessert werden können, sind derzeit in Vorbereitung. Es ist aber bekannt, daß sich Nadelhölzer quer zur Faser verhältnismäßig gut biegsam lassen.

## Stuhlteile- und Faßdaubenherstellung

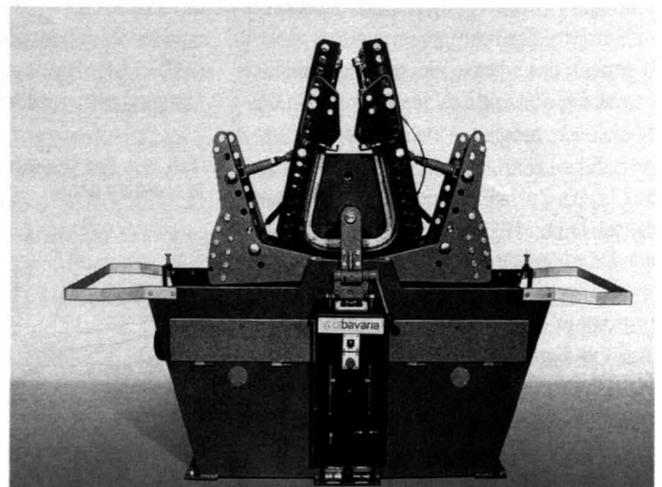
Die Herstellung von gebogenen Stuhlteilen und Faßdauben, unterscheidet sich im wesentlichen dadurch, daß es sich hier um weite und enge Biegungen um eine Achse, sowie Biegungen um mehrere Achsen handelt. Hierauf soll im folgenden eingegangen werden, auch unter Berücksichtigung der Biegeverfahren, sowie dem Einsatz von Hochfrequenz zum Plastifizieren, Trocknen und zur Beeinflussung der Maßhaltigkeit.

## Biegemaschine

Biegungen um mehrere Achsen, wie sie beispielsweise vom Rückenteil des Thonet-Stuhls Nr. 14 (Abb. 1) bekannt sind, sind derzeit nur konventionell und manuell zu fertigen. Teile dieser Art werden zwar auch mit vorgestauchtem Holz gebogen, wobei sich aber immer häufiger zeigt, daß sich derart vorbehandelte Holzteile hinsichtlich ihrer Maßhaltigkeit und Dauerbelastbarkeit deutlich ungünstiger verhalten als Teile, die nach der Thonet-Methode gebogen wurden. Die Stabilisierung erfolgt für einige Stunden in eingespanntem Zustand in der Biegeform in einem Holzrockner.

Einachsige enge Biegungen sind unter dem Gesichtspunkt der industriellen Serienproduktion am besten mit Hilfe einer Biegemaschine herzustellen. Die Abb. 9 zeigt eine solche Maschine für offene, auch unsymmetrische Biegungen bis etwa 200° Bie-

Abb. 9 Holzbiegemaschine für offene, symmetrische und unsymmetrische Biegungen mit Winkeln bis zu etwa 200° (Werkfoto: GHE Bavaria)

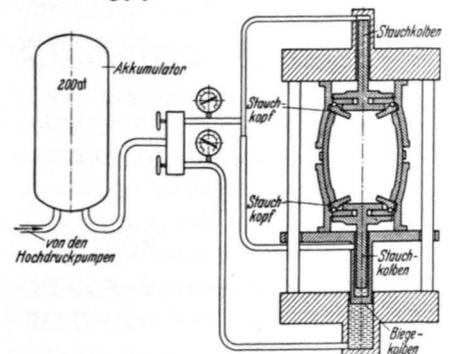


gewinkel. Maschinen dieser Art, die ebenfalls nach der Thonet-Methode arbeiten, gibt es auch als Rundbiegemaschinen zur Herstellung von Kreisen oder Spiralen, sowie in einfacheren Ausführungen für Biegungen bis 160° Biege Winkel.

## Glockenpresse

Unter dem Stichwort Einsatz von Bugholzteilen wurde bereits auf den wiedererwachenden Markt für Eichenfässer hingewiesen. Selbstverständlich wäre es möglich, Faßdauben auf einer der gerade genannten Maschinen zu biegen, und anschließend aus den einzelnen Dauben ein Faß zusammen zu setzen. Beobachtet man aber einen Büttner bei der handwerklichen Herstellung eines Fasses, fallen zwei Dinge auf: keine Faßdaube gleicht der nächsten und die Dichtigkeit des Fasses wird wesentlich durch das gemeinsame Biegen mitbestimmt.

Abb. 10 Glockenpresse zur Faßherstellung [2]



Unter diesen Gesichtspunkten besteht die Forderung, die Faßherstellung so zu mechanisieren, daß die zugeschnittenen und gehobelten Dauben in eine Vorrichtung eingelegt werden, in der sie zu einem Faßrumpf zusammengesetzt, plastifiziert, gebogen und stabilisiert werden. Die Abb. 10 zeigt das Prinzip einer solchen Maschine, die vor vierzig Jahren in der damaligen Stuttgarter Faßfabrik Diener & Roth arbeitete.

## Formpresse

Eine weitere Möglichkeit, weit gebogene Holzteile zu produzieren, ist die Formpresse. Die Abb. 11 zeigt schematisch eine solche Einrichtung, die praktisch einer Furnierpresse, bestückt mit einer Form, entspricht.

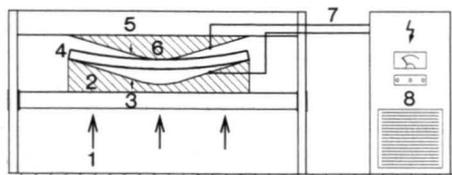


Abb. 11 Formpresse zum Holzbiegen  
1 Preßdruck; 2 Formunterteil; 3 Untere Elektrode; 4 Werkstück; 5 Obere Elektrode; 6 Formoberteil; 7 Zuleitungen; 8 Hochfrequenz-Generator

An diese Form ist ein Hochfrequenz-Generator angeschlossen, der zwischen Patrite und Matrize ein dielektrisches Feld aufbaut. In diesem Feld werden die im Holz enthaltenen Wasseranteile zunächst erhitzt, worauf das Holz mehr und mehr plastifiziert wird. Durch sein Erweichen setzt es dem Druck der Presse immer weniger Widerstand entgegen, wodurch sich die Presse langsam schließt.

## Integriertes Biegeverfahren

Wie bereits begründet, können beim Formpressen Biegungen bis zu einem Radius-/Dicke-Verhältnis von 30:1 erzielt werden. Allerdings benötigt ein Arbeitsgang im Durchschnitt etwa 20 bis 30 min. Dies bedeutet, daß bei einer Arbeitsbreite von 2 m pro Presse in der Stunde nur etwa 30 bis 45 rd. 13 cm breite Stuhllehnteile herzustellen sind. Eine konventionelle Biegemaschine, wie in Abb. 9 gezeigt, biegt pro Arbeitstakt 2 derartige Teile, wofür aber höchstens 30 Sekunden benötigt werden. Das sind pro Stunde also 120 Teile.

Der Vorteil dieser Presse ist, daß Plastifizierung, Biegen und Stabilisierung in einer Maschine und in einem Arbeitsgang zusammengefaßt sind.

Daher ist es eine logische Konsequenz, die Biegeteile auf einer Biegemaschine zu biegen und in der Formpresse zu stabilisieren. Hierdurch läßt sich der verhältnismäßig langsame Biegevorgang der Formpresse vermeiden, und der Trocknungs-/Stabilisierungsvorgang, der bei der konventionellen Maschine separat anfällt, beschleunigen. Mit dieser Methode lassen sich auch – wie Anwender berichten – Bugholzteile mit guter Maßhaltigkeit herstellen. Darüber hinaus ist es mit dieser kombinierten Methode möglich, auch engere Biegungen schnell zu stabilisieren, da die Biegespannungen zunächst von einem Zugband aufgefangen werden, und die Restspannungen schnell abgebaut werden.

## Hochfrequenz- oder Mikrowelleneinsatz?

Neben der Möglichkeit, zu Vorausgegangenem Hochfrequenz-Felder zu verwenden, können auch Mikrowellen eingesetzt werden. Der technische Unterschied beschränkt sich dabei auf die Wellenlänge. Diese beträgt bei Hochfrequenz 11 m, bei Mikrowellen aber nur 2 bis 4 cm. Dieser Umstand macht es erheblich schwieriger, Mikrowellen abzuschirmen.

Weiterhin entsteht bei den Mikrowellen kein Feld zwischen Anode und Kathode, vielmehr strahlt ein Sender die Energie ab. Hierdurch wird auch die jeweilige Anpassung verschiedener Biegeformen an die Wellen sehr aufwendig. Die genannten Gründe haben den physikalisch möglichen industriellen Einsatz der Mikrowellen bisher verhindert.

## Perspektiven wissenschaftlicher Untersuchungen

Die wesentlichen wissenschaftlichen Arbeiten unter dem Begriff „Holzbiegen“ beschäftigen sich mit folgenden zwei Themenkreisen:

- Plastifizierung und deren Optimierung, sowie
- Kräfte und Spannungsverteilung beim Biegen.

Die Stabilisierung und ihre Optimierung ist möglicherweise bisher nicht weiter

beachtet worden, weil sie auch aus der Sicht der Wissenschaft zu sehr unter dem Gesichtspunkt der Holz Trocknung angesehen wurde. Allerdings weist schon Fessel in seinem Bericht über Probleme beim Holzbiegen [2] darauf hin, daß die Untersuchung von Nachbrüchen künftig ein möglicher Forschungsansatz wäre.

Der Gesichtspunkt der Plastifizierung wurde bereits eingangs ausführlich besprochen. Hierzu sollte jedoch noch erwähnt werden, daß unter Laborbedingungen in Deutschland teilweise mit Hochfrequenz, in Japan mit Mikrowellen plastifiziert wird, und das Austrocknen der Randzonen des Holzes durch Einlegen in eine kleine Kunststoff-Röhre bzw. durch Einwickeln in Kunststoff-Folie verhindert wird.

Das Thema „Kräfte und Spannungsverteilung im Biegevorgang“ wurde vor Fessel [2] schon von Prodehl [7], danach noch von Teichgräber [8] sowie Stevens & Turner [6] untersucht. Die Frage, ob und wie eine Beeinflussung der Kräfte im Biegevorgang möglich ist, wird derzeit im Institut untersucht. Mit den Ergebnissen kann in den nächsten Monaten gerechnet werden.

### Schrifttum:

- [1] Heisel, U. und Eggert, O.: Plastifizierung von Bugholz mit Hochfrequenz und Wasserdampf. HOB 37 (1990) 9, S. 18–26
- [2] Fessel, F.: Probleme beim Holzbiegen. Holz als Roh- und Werkstoff 9 (1951) 2, S. 56–62
- [3] Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. Hrsg. W. Beitz und K.-H. Küttner. 17. Aufl. Berlin: Springer 1991
- [4] Kollmann, F.: Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper. Düsseldorf: VDI-Verlag 1967
- [5] Heisel, U., Eggert, O.: Holzbiegen: Zugband oder Vorstauchen? HOB 40 (1993) 5, S. 72–79
- [6] Stevens, W.C. & Turner, N.: Wood Bending Handbook. London: Her Majesty's Stationary Office 1970
- [7] Prodehl, A.: Untersuchungen über das Biegen gedämpften Holzes. Diss. Univ. Dresden 1931
- [8] Teichgräber, R.: Über die Spannungszustände bei der Verformung von Holz und die dadurch geänderten Holzigenschaften. Diss. Univ. Hamburg 1953