

Holzbiegen: Zugband oder Vorstauchen?

Neben dem bekannten Vollholz-Biegeverfahren mit Zugband existieren weitere Verfahren. Diese lassen sich nach der Beeinflussung der Spannungsverhältnisse im Bugholz einteilen. Bei zwei Biegeverfahren wird das Holz hierzu vor dem eigentlichen Biegeprozeß in der Länge gestaucht. Durch dieses Vorstauchen wird Holz in seinen Eigenschaften teilweise erheblich verändert. Der vorliegende Beitrag gibt eine geraffte Übersicht der derzeit bekannten Biegeverfahren, bevor die Veränderung charakteristischer physikalischer Eigenschaften aufgezeigt wird. Weiterhin weist er auf Unterschiede in den Bearbeitungseigenschaften hin, und gibt Hinweise zu möglichen Einsatzgebieten der nach verschiedenen Verfahren hergestellten Vollholzformteile. – Von Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel und Otto Th. Eggert¹⁾.

In der industriellen Produktion gehört das Vollholzbiegen zu den am längsten angewendeten Verfahren, seit Michael Thonet vor etwa 140 Jahren die erste Fabrik eröffnete, in der in arbeitsteiliger Serie Stühle hergestellt wurden (Abb. 1). Bei dem nach ihm benannten Verfahren wird mit Hilfe eines Zugbandes die Dehnung der äußeren Randfasern im Holz verhindert, wodurch Splitterbrüche (Abb. 2) vermie-

den werden. Zu den Versuchen, eben dieses Zugband zu substituieren, und die bereits seit mehr als fünfzig Jahren bekannt sind, gehört auch das Biegen vorgestauchter Hölzer.

Beim Holzbiegen werden in der Regel drei Arbeitsschritte durchlaufen, das Plastifizieren, das Biegen und das Stabilisieren. Beim Plastifizieren wird das Holz durch Einwirkung von Wärme und Feuchte in einen elastoplastisch

formbaren Zustand überführt, es wird erweicht. Im Biegevorgang wird die gewünschte Form erzielt. Das Stabilisieren dient dem Abbau noch vorhandener elastischer Rückstellkräfte. Beschreibungen der einzelnen Verfahrensschritte finden sich unter anderem bei [1, 2].

Problemstellung

Biegt man einen Werkstoff, so wird in der Regel die konvexe Seite gedehnt, während die konkave Seite gestaucht wird. Dazwischen (genauer: im Flächenschwerpunkt des Querschnittes) befindet sich eine Zone, in der sich die Zugspannungen der kurvenäußeren und die Druckspannungen der kurveninneren Seite aufheben, und die spannungslose [3] oder neutrale Zone [4] genannt wird. Das grundsätzliche Problem beim Holzbiegen ist, daß Zugspannungen im Holz nur in einem sehr geringen Teil in entsprechende Dehnungen umgesetzt werden können, bevor der Werkstoff durch Splitterbruch (Aufbrechen und -stellen der Fasern, Abb. 2) versagt. Beim Biegen um eine Form gilt:

$$\epsilon \geq S / 2R$$

(ϵ : Dehnung, z: Zug, S: Dicke des Holzes, R: Formradius)

Zugversuche haben ergeben, daß die maximal ertragbare Dehnung des plastifizierten Buchenholzes im Bereich von 1 bis 2% liegt [4, 5, 6 (und andere)], wodurch sich ein rechnerisches maximales Biegeverhältnis $B = S / R$ von etwa 1/30 ergibt.

Ist man aber in der Lage, die Dehnung der Außenfaser innerhalb der zulässigen Grenzen zu halten, oder diese Grenzen zu verschieben, ist die Herstellung wesentlich enger Biegungen möglich. Hierzu sind folgende Verfahren bekannt (Abb. 3):

Verfahrensübersicht

Holzbiegen ohne Längung der konvexen Seite

Biegen mit Zugband

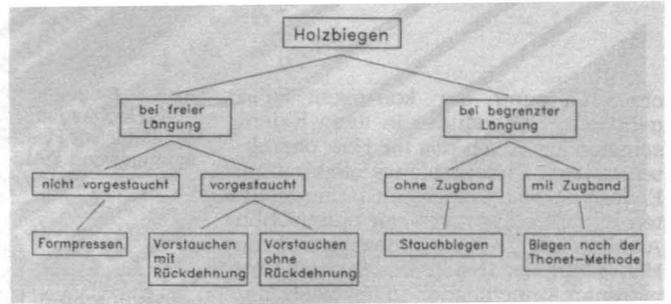
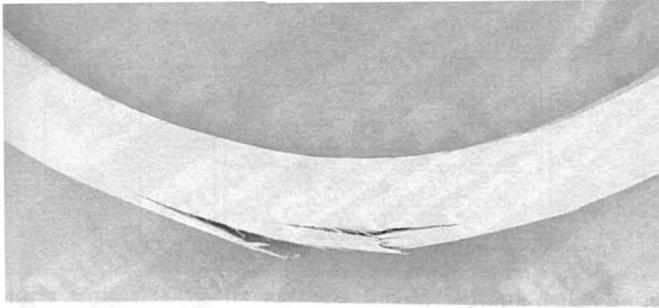
Das Zugband aus Stahl an der Außenseite der Biegung nimmt die auftretenden Spannungen praktisch vollkommen auf, weshalb beim Holzbiegen Zugband und Bugholz auch als ein System angesehen werden müssen. Das Verfahren ist verhältnismäßig einfach zu beherrschen. Biegemaschinen, die nach diesem System arbeiten, sind für offene Biegungen (U-Form) bis zu einem Biegewinkel von etwa 200° und für Rundbiegungen (geschlossene Kreise, Schnecken usw.) auch über 360° hinaus erhältlich (Abb. 4, 5). Mehrachsige Biegungen müssen nach wie vor manuell hergestellt werden (Abb. 1).

Der Nachteil des Holzbiegens nach der Thonet-Methode mit Zugband liegt demgemäß in der gemeinsamen Handhabung von Werkstoff und Zugband, wobei im einfachsten Fall, der offenen Biegung, dieses Zugband auch bis zur endgültigen Stabilisierung am Werk-

¹⁾ Prof. 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.

Abb. 1: Industrielle Produktionsmethoden werden bei der Stuhlherstellung schon seit mehr als 100 Jahren angewandt (Archivbild Gebr. Thonet, Frankenberg)





stück verbleiben sollte. Bei aufwendigeren Biegungen (Rundbiegen, Biegen mehrachsiger Formen) müssen Form und Zugband in der Stabilisierungsphase am Werkstück verbleiben, da andernfalls entweder Spannungsrisse durch das visko-elastoplastische Verhalten des noch teilplastifizierten Holzes dieses an der dann entstehenden Zugzone einreißen lassen, oder Rückstellkräfte wirksam werden, durch die das Werkstück die gewünschte Form verliert. Auch bedingt jede Formlänge ein unterschiedliches Zugband.

Stauchbiegen

Der prinzipielle Unterschied zum Biegen mit Zugband beschränkt sich darauf, daß beim Stauchbiegen die Längung der konvexen Seite statt durch ein Zugband durch eine Stauchvorrichtung verhindert wird. Maschinen dieser Art wurden noch bis in die sechziger Jahre zur Herstellung von Holzfässern verwendet. Konsequenter Weise bedeutet dies, daß der Stauchdruck ebenfalls bis zur endgültigen Stabilisierung aufrecht erhalten werden muß.

Holzbiegen bei freier Längung

Während bei den Holzbiegeverfahren ohne Längung der konvexen Seite die im Biegevorgang entstehenden Zugspannungen durch Druckspannung überlagert werden und dadurch die Grenze der zulässigen Dehnung einhalten, ist den Biegeverfahren bei freier Längung gemein, daß bei ihrer Anwendung diese Grenzen verschoben werden.

Formpressen

Wie bei der Herstellung von Furnierformteilen wird auch beim Formpressen

▲ Abb. 2: Splitterbruch aufgrund zu hoher Zugspannungen auf der konvexen Biegeseite

Abb. 3: Einteilung der Verfahren zum Holzbiegen

das Holz zwischen Formober- und Unterseite gelegt. Diese beiden Formen sind als Elektroden ausgebildet, zwischen denen ein hochfrequentes Wechselfeld anliegt (Abb. 6). Während des Biegevorganges werden die Wasseranteile des Holzes permanent durch das Hochfrequenzfeld erhitzt, wodurch zunächst das Holz plastifiziert, später stabilisiert wird. Da der Biegevorgang verhältnismäßig langsam abläuft (ca. 30 min. bei $S=20\text{ mm}$ und $R=300\text{ mm}$), kann davon ausgegangen werden, daß die hier im viskoelastischen Bereich gebogen wird, d.h. es findet ein Fließvorgang statt, wodurch der elastische Dehnungsanteil (Zugspannungen) klein gehalten wird.

Vorstauchen, Biegen mit Stauchbiegeholz

In letzter Zeit ist das Vorstauchen zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Als Grund dafür kann gesehen werden, daß die Firma Compwood, Kopenhagen, auf der Ligna '91 mit großem Aufwand eine neue Vorstauchmaschine präsentierte, während kurz zuvor die Firma Candidus Prugger, Brixen, das Produktionsprogramm der Gesellschaft für Holzveredelung, Selters (Patent-Biegeholz) übernommen hatte. Hinsichtlich der Begriffe ist zu beachten, daß Stauchbiegen und Stauchbiegeholz für zwei verschiedene Verfahren stehen. Sie unterscheiden sich darin, daß beim Stauchbiegen die Stauchkraft während des Biegevor-

ganges aufgebracht wird, während Stauchbiegeholz nur der Länge nach vorgestaucht wird, um dann in einem zweiten Arbeitsgang geformt zu werden.

Vorstauchen ohne Rückdehnung

In beiden Fällen wird das Holz zunächst, wie auch bei den übrigen Biegeverfahren, plastifiziert. Im Anschluß daran wird es der Länge nach gestaucht. Beim sogenannten Patent-Biegeholz wird es dann für einen längeren Zeitraum in Formzwangslage gelagert, worauf die viskoelastischen Spannungsanteile völlig abgebaut werden. Es findet also keine Rückdehnung mehr statt. Solcherart vorgestauchtes Holz ist reversibel formbar.

Vorstauchen mit Rückdehnung

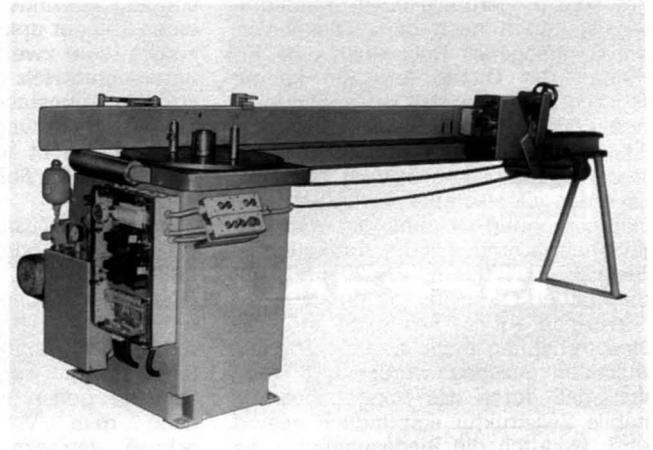
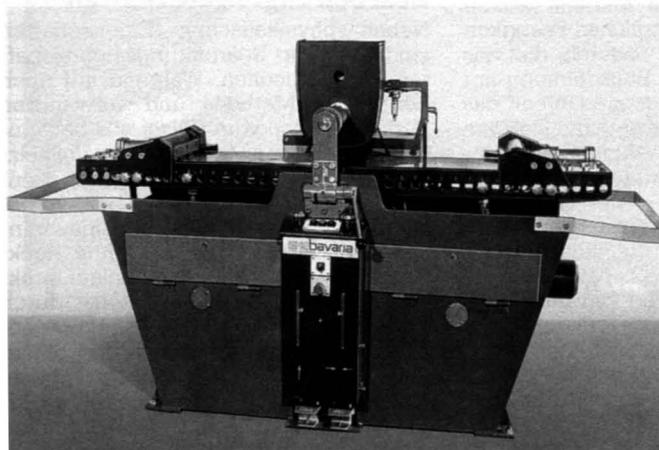
Im Unterschied dazu kann sich das Holz nach der Methode Compwood nach dem Stauchprozeß zurückdehnen, und nimmt den ursprünglichen Betrag auch wieder bis auf etwa 5 % plastischen Stauchanteil an. Laut Compwood sollte der so vorbehandelte Werkstoff unmittelbar nach dem Vorstauchen im noch plastifizierten Zustand weiterbearbeitet, also gebogen werden.

Das Biegeverfahren beeinflusst die Werkstoffeigenschaften

Vergleicht man die mechanischen Eigenschaften der nach verschiedenen Verfahren hergestellten Bughölzer, ist zunächst festzustellen, daß die beiden

Abb. 4: Holzbiegemaschine für offene Biegungen bis etwa 190° (GHE bavaria)

Abb. 5: Holzbiegemaschine für geschlossene Biegungen, auch über 360° (GHE bavaria)



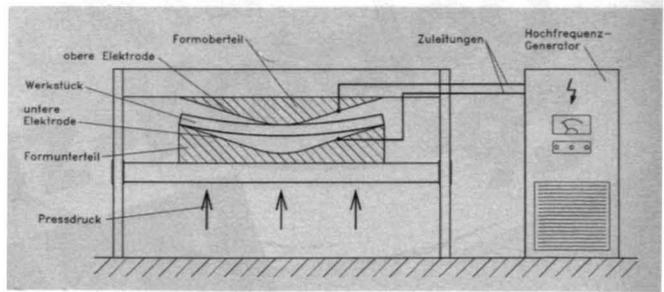
ohne Längung der konvexen Seite gebogenen Werkstücke in ihren Eigenschaften innerhalb des für Holz charakteristischen Streubereiches gleich sind. Ebenso verhält es sich mit formgepreßten Bughölzern. Im Fall der praktischen Anwendung bedeutet dies, gebogene Hölzer, die nach den Verfahren Formpressen, Stauchbiegen oder nach der Thonet-Methode hergestellt sind, haben nahezu identische Eigenschaften. Weiterhin sind die, durch die Wahl des Biegeverfahrens bedingten, physikalischen Veränderungen im Holz, verglichen mit ungebogenem Holz, so gering, daß sie nur unter Laborbedingungen erkennbar sind.

Im Gegensatz dazu wird Holz durch das Vorstauchen in seinen Eigenschaften verändert. Als besonders wichtige und charakteristische physikalische Eigenschaft kann bei Holzteilen die Biegespannung und der Biege-Elastizitätsmodul angesehen werden. Daneben ist die Beeinflussung der Holzdicke durch das Vorstauchen interessant. Die Ergebnisse diesbezüglicher Untersuchungen sollen im folgenden kurz dargestellt und diskutiert werden. Sie beziehen sich auf den Werkstoff Rotbuche (*fagus sylvatica* L.).

Festigkeitswerte

Die erste Vergleichsangabe bezieht sich auf die Dichte. Sie beträgt bei dem untersuchten Buchenholz im Mittel $\rho \sim$

Abb. 6: Biegepresse mit Hochfrequenz-Generator zur Plastifizierung und Stabilisierung



vorgestauchten Hölzer erheblich unter jener nicht vorgestauchter Hölzer liegt. Allerdings bekommen vorgestauchte Hölzer verfahrensbedingt gewollt elastische Eigenschaften, so daß hier kein Bruch auftritt. Die angegebene Maximalspannung ist somit als Grenzwert zu verstehen, bei dem sich das Patent-Biegeholz (Handelsname des Herstellers) nahezu beliebig formen läßt.

Die Nachgiebigkeit im Belastungsfall läßt sich besonders gut durch den Elastizitätsmodul (kurz E-Modul) ausdrücken. Es gilt:

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

mit σ : Spannung [N/mm²],
 ϵ : Dehnung [%].

Im untersuchten Fall wurde der Biege-E-Modul gemessen, der wiederum für Bugholz besonders relevant ist. In Analogie zur Biegespannung ist auch hier ersichtlich, daß der nicht vorgestauchte Werkstoff erheblich steifer ist, als die beiden vorgestauchten. Besonders auffällig ist der geringe E-Modul des ohne Rückdehnung vorgestauchten Holzes, gerade im Vergleich zu dem mit Rückdehnung vorgestauchten Werk-

Modul von bis zu 9 000 N/mm² erreichen kann, während nach dem Vorstauchen natürlich getrocknetes Holz einen E-Modul zwischen 6 000 und 7 000 N/mm² hat.

Ein wesentlicher Aspekt neben den genannten ist bei Formteilen die Formstabilität. Hierzu liegt nur eine Untersuchung vor, die sich allerdings isoliert mit der Formstabilität von nach dem Thonet-Verfahren gebogenen Teilen in Abhängigkeit der Feuchte beschäftigt [7]. Sie besagt, daß bei mit Zugband gebogenen Vollholzteilen bei Feuchteaufnahme der Radius geringfügig größer wird, und bei Trocknung geringfügig abnimmt. Bei porenschließender Lackierung kann also davon ausgegangen werden, daß diese Teile Langzeitformstabil sind, was auch durch die Erfahrung mit alten Thonet-Stühlen bestätigt wird. Das ohne Rückdehnung gebogene Holz ist plastisch formbar, eine Formstabilität in diesem Sinne ist also gar nicht gewünscht. Für die Formstabilität von mit Rückdehnung vorgestauchten Biegehölzern liegt keine Erfahrung vor. Verschiedentlich wurde von Anwendern hierzu berichtet, daß aber besonders in geraden Bereichen (z. B. Stuhlfüßen) eine Tendenz zur Wellung besteht.

Ebenfalls als Indikator für die Formstabilität kann die Biegefestigkeit angesehen werden. Der Versuch hierzu wurde nach DIN 52 186 durchgeführt. Das Ergebnis ist insofern erstaunlich, als die Biegefestigkeit der ohne Rückdehnung vorgestauchten Hölzer hier höher liegt, als die mit Rückdehnung vorgestauchten. Diese Ergebnisse stehen eindeutig im Widerspruch zur herrschenden Theorie, und werden künftig sicher noch Gegenstand einer umfangreichen Untersuchung sein.

Bearbeitungseigenschaften

Neben physikalischen Eigenschaften sind auch die Bearbeitungseigenschaften unterschiedlich. Während auf nach der Thonet-Methode und verwandten Verfahren gebogene Hölzer alle bekannten Bearbeitungsverfahren zur Vollholzbearbeitung angewendet werden können, gilt diese Aussage bei vorgestauchten Hölzern nur mit Einschränkung. Vorgestauchtes Holz ohne Rückdehnung läßt sich im Gegenlauf praktisch nicht bearbeiten, da sonst durch die Zerspanungskräfte regelrechte Löcher von bis zu 5 mm Tiefe und bis zu mehreren Quadratzentimetern Fläche aus der Oberfläche gerissen werden.

Das Erzielen einer einwandfreien Oberflächenqualität ist bei vorgestauch-

Verfahren	Thonet-Methode	Vorgestauchtes Holz	
		ohne Rückdehnung	mit Rückdehnung
Dichte [kg/m ³]	729	888	845
mittl. Stauchgrad [%]	3,2	20	15
errechnete Dichte, ungestaucht [kg/m ³]	707	740	735
mittl. Biege- E- Modul [N/mm ²]	11 000	3900	6400
mittl. Biegefestigkeit [N/mm ²] (*: Bruch)	112 *	68	56

Tafel 1: Vergleich charakteristischer physikalischer Eigenschaften verschiedenartig hergestellter Bughölzer

730 kg/m³ (bei $u = 7$ %). Bei vorgestauchten Proben findet eine Dichteerhöhung statt, die proportional ihres Stauchgrades ist. Auch nach dem Thonet-Verfahren gebogenes Holz weist eine Erhöhung der Dichte auf. Sie kommt dadurch zustande, daß die spannungsfreie Zone auf der konvexen Seite der Biegung liegt, wodurch das Holz im Biegevorgang gestaucht wird, ohne daß sich der Querschnitt verändert. Die Dichteerhöhung ist abhängig vom Biegeverhältnis und fällt im untersuchten Beispiel ($r = 170$ mm, $D = 30$ mm) mit knapp über 3 % relativ gering aus.

In bezug auf die Festigkeit kann die Dichteerhöhung nicht als Proportionalitätsfaktor gesehen werden. Es zeigt sich, daß durch das Vorstauchen die stabile Zellstruktur empfindlich gestört wird, wodurch die Biegespannung der

stoff. Es kann versucht werden, diesen Unterschied auf zwei Arten zu erklären: Zum einen dadurch, daß vermutet wird, durch die Relaxation nach dem Stauchvorgang gewinnt das Material wieder einen Teil der ursprünglichen Festigkeit zurück, zum zweiten dadurch, daß das untersuchte Holz mit Rückdehnung nur zu 15 % vorgestaucht war, während das ohne Rückdehnung gestauchte Holz um 20 % gestaucht war. Vermutlich kommen beide Einflußfaktoren gemeinsam zum Tragen.

In diesem Zusammenhang ist wichtig, daß Anwender mitteilen, die Steifigkeit (E-Modul, Biegespannung) der Hölzer sei entscheidend von der Trocknungsmethode geprägt. Behauptungen dieser Art konnten zwar noch nicht nachgeprüft werden, entsprechende Berichte gehen aber davon aus, daß nach dem Vorstauchen technisch schnell getrocknetes Holz einen E-

ten Hölzern generell schwierig. Beim Schleifen, bei dem die Holzzellen bekanntlich auf- und angerissen werden, zeigen sich bei genauer Betrachtung der Oberflächen ebenfalls makroskopisch kleine Risse, die durch den Vorstauchprozeß bedingt sind (Abb. 7). Um eine einwandfreie Oberflächenqualität zu erreichen, ist somit ein erhöhter Schleifaufwand mit feinkörnigen Schleifbändern nötig. Bei der Fräsbearbeitung im Gleichlauf sind aber gute Oberflächen relativ einfach erzielbar.

Bevorzugte Einsatzgebiete

Vollholzbiegen ist aufgrund des maschinellen Aufwandes zunächst ein Verfahren zur Serienproduktion geformter Holzteile. Nach wie vor die größte Bedeutung dabei hat das klassische Thonet-Verfahren. Hiermit hergestellte Teile haben die beste Stabilität und die besten Festigkeitswerte. Diese Teile eignen sich sehr gut zur Stuhlproduktion. Soweit sie maschinell gebogen werden können, kann auch der Ausschuß gering gehalten werden. Gleichwertig neben dem Biegen mit Zugband steht das Formpressen, allerdings nur bis zu einem Biegeverhältnis von $B = 1/12$. Das Stauchbiegen wurde in erster Linie zur Herstellung von Schwerfässern aus Holz eingeführt. Aufgrund der Nachfragesituation kann es heute als praktisch bedeutungslos angesehen werden.

Diesen Verfahren steht das Biegen mit vorgestauchten Hölzern gegenüber. Ohne Rückdehnung vorgestauchtes Holz ist weitgehend plastisch formbar. Daher eignet es sich bevorzugt für Zierleisten, Umleimer und vergleichbare Teile, bei denen die Festigkeit und die Formbeständigkeit keine Rolle spielen. Holz, das mit Rückdehnung vorgestaucht wurde, liegt in seiner Festigkeit und Steifheit zwischen konventionell gebogenem und ohne Rückdehnung vorgestauchtem Holz. Durch den Vorstauchprozeß wird die natürliche Schwankungsbreite der Holzfestigkeit etwas nivelliert. Daher eignet sich das Verfahren gut zur Anfertigung von Einzelstücken und Kleinserien, bei denen eine Biegeform verfahrensbedingt etwas einfacher ausfallen kann, als bei den konventionellen Vollholz-Biegeverfahren. Die Formstabilität entspricht aber noch nicht ganz den Erwartungen. Dazu kommt, daß in der Praxis der Aufwand und damit auch die Produktionskosten für Formteile aus vorgestauchtem Holz insgesamt noch höher liegen, als für nicht vorgestauchtes. Besonders Formstabilität, Festigkeit und Produktions- bzw. Anlagenaufwand sind Ansatzpunkte, ohne deren Verbesserung eine weitere Marktdurchdringung des Biegens von mit Rückdehnung vorgestauchten Hölzern derzeit als unwahrscheinlich angesehen werden kann.

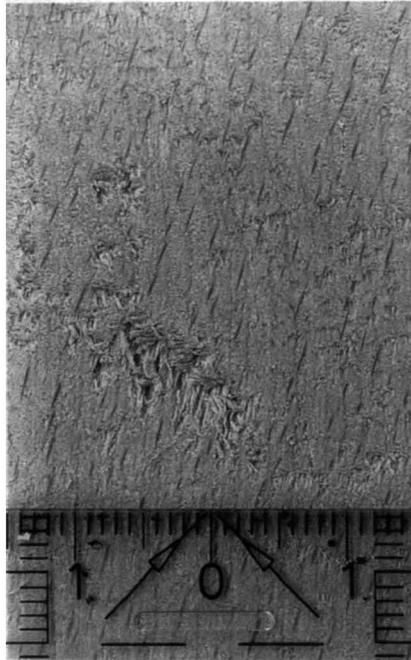


Abb. 7: Kleine Ausrisse an der Oberfläche lassen sich praktisch nur durch Fräsen im Gleichlauf oder durch aufwendiges Schleifen verhindern (Bildnachweis: Verfasser)

- von Bugholz mit Hochfrequenz oder Wasserdampf. HOB 37 (1990) 9, S. 18 - 26.
- [2] Andes, L.E.: Die Holzbiegerei. Hartleben, Wien 1903. Nachdruck. Edition Fricke im Müller Verlag, Köln 1986.
- [3] Kossatz, G., Klieber, E.: Vergütete Hölzer. Leipzig: Teubner 1955.
- [4] Prodehl, A.: Untersuchungen über das Biegen gedämpften Holzes. Diss. Univ. Dresden 1931.
- [5] Fessel, F.: Probleme beim Holzbiegen. Holz als Roh- und Werkstoff 9 (1951), 2, S. 56 - 62.
- [6] Stevens, W.C., Turner, N.: Wood Bending Handbook. London: Her Majesty's Stationary Office 1970.
- [7] Aoki, T., Norimoto, N.: Wood Bending Utilizing Microwave Heating - Changes of Curvature of Bentwood due to Moisture Change. Wood Research and Technical Notes 4 (1983).

HOB-KENNZIFFER **87**

Literatur

[1] Heisel, U., Eggert, O.: Plastifizierung