

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 108 (1990)
Heft: 39

Artikel: Sortierung und Qualität von Bauholz. Teil IV: Apparative Möglichkeiten zur Erfassung der Holzcharakteristka
Autor: Meierhofer, U. / Richter, K.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77517>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 04.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Sortierung und Qualität von Bauholz

Teil IV: Apparative Möglichkeiten zur Erfassung von Holzcharakteristika

Der nachfolgende Aufsatz beschliesst eine Artikelserie über ein NFP-Projekt, in dem die organisatorischen und technischen Möglichkeiten zur Verbesserung der bestehenden Sortierverfahren analysiert wurden. Im folgenden letzten Teil werden bestehende Methoden zur Erfassung von Holz-Kenngrössen vorgestellt und beurteilt, inwiefern sie für einfache apparative Sortierhilfen gemäss einem für spezifische schweizerische Verhältnisse definierten Anforderungsprofil umgesetzt werden können.

Einleitung

Ausgehend von den grundlegenden Beziehungen zwischen den Holzeigenschaften, der Holzqualität und der Qua-

VON U. MEIERHOFER UND
K. RICHTER,
DÜBENDORF

lität der Holzanwendung wurden in den ersten Teilen der Artikelserie die Notwendigkeit einer effizienteren Sortierung und deren Auswirkungen auf die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Holzbaus sowie auf das ingenieurmässige Image des Holzes aufgezeigt. Da eine Verbesserung der Sortierpraxis gegenüber den bisherigen, auf visueller Beurteilung beruhenden Verfahren den Einsatz von apparativen Sortierhilfen voraussetzt, wurden die holztechnologischen Parameter beleuchtet, die zur Abschätzung der Tragfähigkeit des Holzes erfasst werden müssen. Hier stehen als Zielgrössen die Wuchseigenschaft Dichte bzw. der damit gut korrelierende E-Modul und/oder das Strukturmerkmal Astigkeit eindeutig im Vordergrund. Unter Beachtung der organisatorischen Randbedingungen wurden die Möglichkeiten einer wertschöpfenden Sortimentsbildung in den verschiedenen Stufen der Holzverarbeitung aufgezeigt und die Anforderungen an eine praxistaugliche apparative Sortierhilfe umschrieben. In den letzten 30 Jahren wurden verschiedene Methoden und Verfahren zur Erfassung von Holzkenngrossen entwickelt, getestet und teilweise mit Erfolg eingesetzt. Nachstehend werden die Verfahren, die in der Regel mechanische Eigenschaften (z.B. Verformungen, Härte) oder physikalische Kenngrössen (z.B. Eigen-

frequenz, Impulslaufzeit) als Indikatorgrössen für das Festigkeitsverhalten erfassen, folgendermassen gegliedert:

- Biegeverfahren
- Schwingungsverfahren
- Durchstrahlungsverfahren
- optische Verfahren
- Penetrationsverfahren
- Härteprüfung.

Nicht berücksichtigt in dieser Zusammenstellung werden Methoden, die bis heute lediglich zu Untersuchungszwecken dienen oder deren Anwendung vom technischen Aufwand her aussichtslos erscheint bzw. deren Entwicklungsstand noch weit von einem Praxis-einsatz entfernt ist, z.B. Bruchmechanik, Fotoelastic-coating, Fotostress, Piezoelektrizität, mechanische Impedanz, Laserholographie usw.

Biegeverfahren

Statische Biegeverformung zur Bestimmung des Biegeelastizitätsmoduls

Bei diesem Verfahren wird Schnittholz einer statischen Biegebeanspruchung unterworfen und über die Messung der Verformung der Biegeelastizitätsmodul (E) berechnet (Hoyle 1968). Es handelt sich um das z.Zt. wichtigste, erfolgreichste und genaueste Verfahren, um mittels einer Einzelmessung auf eine Festigkeit (meist Biegefestigkeit, aber auch Zug- und Druckfestigkeit) zu schliessen. Zwischen den Biegeverformungen (bzw. den daraus ermittelten E -Moduln) und den Biegefestigkeiten sind beachtlich hohe Korrelationskoeffizienten (bis gegen 0,7...0,8) nachgewiesen (Glos, Schulz 1980).

Leider lassen sich die vielen angelsächsischen und skandinavischen Untersu-

Der erste Teil wurde in Heft 27/28, 1988, der zweite Teil in Heft 7, 1989, der dritte Teil in Heft 39, 1989, veröffentlicht.

chungen und Entwicklungen in diesem Bereich nur sehr bedingt auf schweizerische Verhältnisse übertragen. In jenen Ländern wird üblicherweise mit verhältnismässig kleinen und brettartigen Querschnitten gebaut; entsprechend sind die meisten Biegeprüf- bzw. Sortiermaschinen nur für Elementdicken bis 75 mm (einige sogar für noch geringere) ausgelegt.

Diese geringen Dicken erlauben es, die Prüf-Spannweiten in den Biegemaschinen verhältnismässig klein zu halten (zwischen 0,9 m und 1,2 m) und dennoch messtechnisch gut erfassbare Verformungen zu erhalten (Bild 1). Die geringen Spannweiten ermöglichen eine mehr oder weniger lokale Bewertung der Auswirkung von Strukturstörungen oder Wuchsmerkmalen, so dass diese bei der Weiterverarbeitung berücksichtigt werden können. Folgerichtig finden die Biege-(Sortier-)Maschinen im Holzleimbau eine ausgezeichnete Einsatzmöglichkeit, wo dünne (biegeweiche) Bretter sortiert und verarbeitet werden müssen.

Anders stellt sich die Situation beim Konstruktionsholz dar. Die in Mitteleuropa üblicherweise verwendeten Querschnitte weisen meist Minimalabmessungen der kleineren Querschnittsseite zwischen 10 cm und 18 cm auf. Das heisst, die Dimensionen, die dann als Balken-«Höhe» bei der Biegeprüfung zu berücksichtigen wären, sind wesentlich grösser, als dies bei den kommerziellen Biegemaschinen üblich ist. Die grösseren Abmessungen erfordern demnach auch wesentlich grössere Spannweiten (3 m bis 5 m), damit

- die Schubspannungen nicht zu gross werden
- die Prüflasten nicht zu gross werden
- keine Querdruckprobleme auftreten
- die zu messenden Verformungen nicht zu klein sind.

Bei einer Prüflänge von über zwei Metern ist jedoch der Einfluss der lokalen Strukturstörungen oder Wuchsmerkmale auf die Messgrösse nurmehr gering. Dennoch zeigen verschiedene Untersuchungen (Govers 1968; Vinopal 1980), dass es möglich ist, aus den über grössere Spannweiten gemessenen Gesamt- E -Moduln mit passabler Genauigkeit auf die gesuchten Festigkeitsgrössen zu schliessen. Als besonderer Vor-

teil der Biegeverfahren ist zu werten, dass über den Gesamt-E-Modul auch die *Verformungssteifigkeit* der einzelnen Balken direkt erfasst und als Sortiergrösse berücksichtigt werden kann. Bekanntlich ist für einen erheblichen Anteil der in Mitteleuropa üblichen Holzkonstruktionen nicht die Festigkeit, sondern die *Steifigkeit* das ausschlaggebende Kriterium bei der Dimensionierung.

Aufgrund der erwähnten Voraussetzungen müssen die z.Zt. auf dem Markt erhältlichen Biegemaschinen (siehe *Glos* 1983) als für schweizerische Verhältnisse ungeeignet bezeichnet werden. Die Kosten der für die Brettsortierung konzipierten stationären Maschinen schwanken zwischen 10 000 Fr. und 300 000 Fr.; eine Anpassung zur Prüfung von Balkenquerschnitten ist – wie aufgezeigt – aus technischen Gründen nicht möglich. Daher lassen sich die gestellten Anforderungen mit diesem Prüfprinzip nicht erfüllen.

Sonstige mechanische Belastungsverfahren

Ebenfalls zu den Biegeverfahren zählt die in den Untersuchungen von *Ather-ton* (1980) verwendete Methode, bei der über Biegeverformungen die *Proportionalitätsgrenze* bei Douglasienholz ermittelt und daraus auf die Festigkeiten geschlossen wird. Auch das *Prüflast-Verfahren* (*proof-loading; in-grade testing*), bei dem Prüflinge auf eine bestimmte Spannung (Grenzlast) belastet werden (*Madsen* 1978), erfordert eine Biege-Prüfeinrichtung. Damit ist bei den nicht gebrochenen Balken eine dem Grenzwert entsprechende minimale Tragfähigkeit sichergestellt, doch herrscht trotz vielen entsprechenden Untersuchungen Ungewissheit über das Mass der Vorschädigung bei den «gerade nicht gebrochenen» Prüflingen.

Eine hinsichtlich der Vorschädigung interessante Ergänzung des Prüflast-Verfahrens bietet die *Schallemissionsanalyse*, bei der die akustische Abstrahlung eines mechanisch beanspruchten Prüfkörpers gemessen und registriert wird, die beim Entstehen von Mikrorissen auftritt (*Ansell* 1982). Nach Untersuchungen von *Morgeneret* al. (1980) sind bei Nadelholz ab 50% der Bruchlast Mikrobrüche und daraus resultierende Schallsignale nachweisbar, d.h. bei einem Lastniveau, bei dem mit Sicherheit noch keine Vorschädigung messbar ist. Zwischen der Zugfestigkeit und der aufsummierten Schallenergie bei 1000 emittierten Schallsignalen wurden Korrelationen bis zu 0,91 festgestellt (*Knuffel* 1988). Die bisherigen, von *Niemz* (1989) zusammengefassten Erkenntnis-

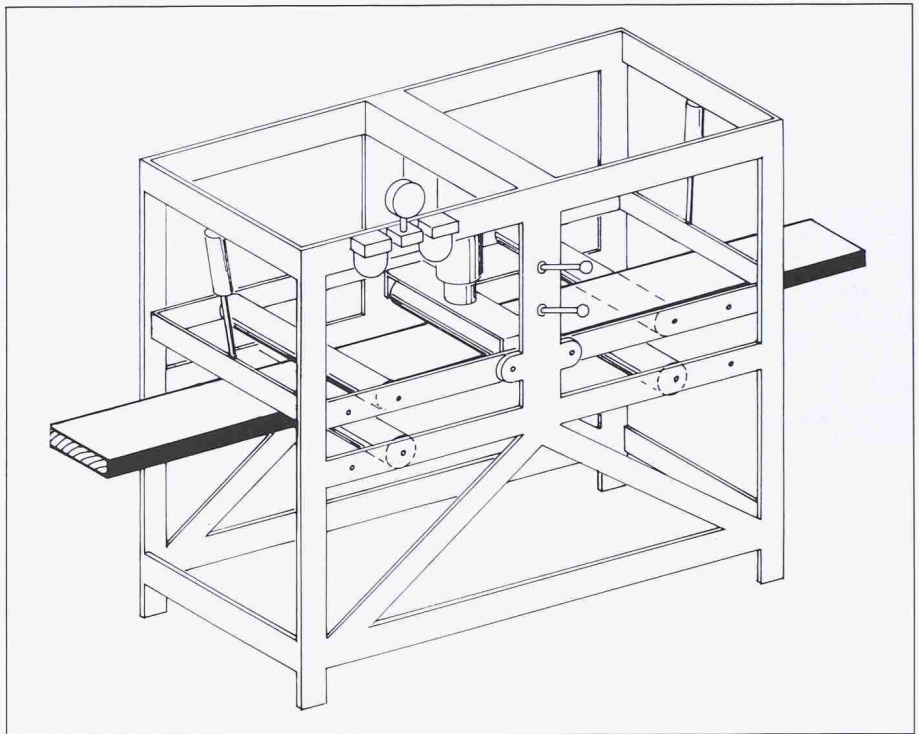


Bild 1. Ansicht eines sehr einfachen (handbetriebenen) Typs eines Biegesortiergeräts: TRU Timber Grader MK-3 aus Südafrika mit einer mittigen Belastung über eine Spannweite von 900 mm oder 1200 mm

se deuten an, dass sich aus den Charakteristika der Schallemission ein Zusammenhang mit der (Gesamt-)Festigkeit von Holz und Holzwerkstoffen ableiten lässt. Damit liesse sich eine Prüf- bzw. Sortiermethode entwickeln, bestehend aus einer (mechanischen) Belastungseinrichtung und Detektoren für Schallemission (Bild 2). Als Resultat einer solchen Entwicklung könnte u.U. eine verhältnismässig einfache und genaue Prüfmaschine, keinesfalls aber ein mobiles (Hand-)Gerät erwartet werden.

Schwingungsverfahren

Unter den zerstörungsfreien Schwingungsverfahren werden die dynamischen, langwelligen Biegeprüfungen, die Spannungswellen- sowie die Schallwellen-Verfahren zusammengefasst. Obwohl sie z.T. unterschiedliche physikalische Messgrössen erfassen, zeichnen sie sich alle dadurch aus, dass zur Ermittlung der Zielgrösse «E-Modul» (bzw. Festigkeit) stets auch die *Materialdichte* erfasst werden muss. Ein meist beträchtlicher Einsatz von Elektronik verhinderte bisher einen nennenswerten Praxiseinsatz der Schwingungsverfahren, doch dürften die gegenwärtigen Entwicklungen in der Messelektronik und Datenverarbeitung diese Schwelle abbauen.

Langwellige Biegeschwingung

Zur Bestimmung des dynamischen Biege-E-Moduls wird ein Biegebalken, der

auf zwei Auflagen ruht, durch einen Impuls von aussen in eine (transversale gedämpfte) Schwingung unter Eigenfrequenz gesetzt (*Kollmann, Krech* 1960). Die Ankoppelung von Messfühler an den schwingenden Balken kann heute berührungslos erfolgen, so dass der Arbeitsablauf im praktischen Betrieb nicht wesentlich behindert würde. Die Massebestimmung (Gewicht, Abmessungen) kann umgangen werden, indem zusätzliche Gewichte auf den

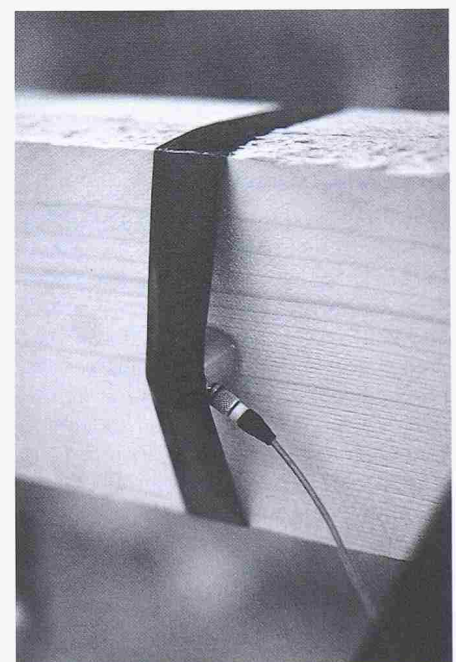


Bild 2. Mikrophon zur Detektion von Schallemissionen während einer Labor-Biegeprüfung an der EMPA

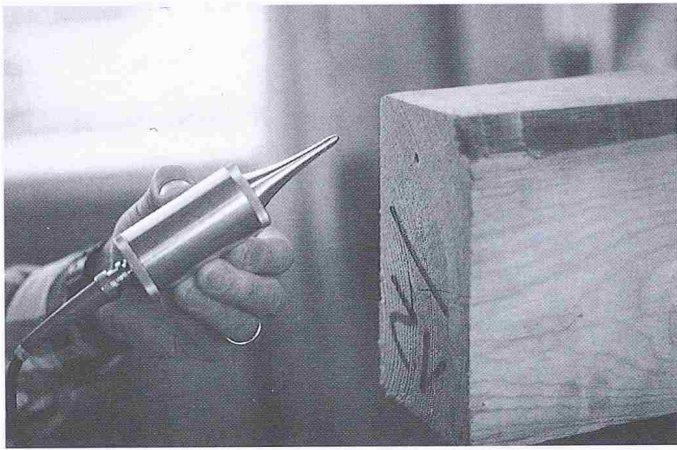


Bild 3. Ultraschall-sender/-fühler mit stumpfer Spitze, die stirnseitig ins nasse Nadelholz eingedrückt werden kann

Balken aufgebracht werden, so dass das Eigengewicht vernachlässigt werden könnte. Die von Walters, Westbook (1970) ermittelten Korrelationen zwischen $E_{\text{dynamisch}}$ und E_{statisch} liegen um 0,9; Schöne (1989) berichtet aus Versuchen an Brettschichtholzträgern in Bauholzdimension von Korrelationen zwischen den dynamischen E -Moduln (Biegeschwingung und Ultraschall) und dem statischen E -Modul von 0,84 und 0,92. Gemessen an der Reststreuung beschreibt die mit Hilfe der Biegeschwingung aufgestellte Regressionsgleichung die Biegefestigkeit im Vergleich mit anderen Verfahren am besten (Schöne 1989).

Bei einem Kostenrahmen für die heute verfügbaren Geräte von 10 000 Fr. bis 20 000 Fr. könnte diese Schwingungsmethode eine echte Alternative zur statischen Biegeprüfung bieten, zumal der Bauteilabmessung dabei theoretisch keine Grenzen gesetzt sind. Gegen eine Umsetzung der Erkenntnisse in transportable Prüfeinheiten sprechen gegenwärtig vor allem prüftechnische Gründe, so dass das Verfahren hauptsächlich im stationären Betrieb einsetzbar sein dürfte.

Spannungswellen

Spannungswellen beruhen auf longitudinalen Schwingungen, die an einem Ende schlagartig induziert, als Dehn- bzw. Kompressionswellen längs durch den Prüfbalken laufen und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit (*stresswave propagation*) am anderen Ende gemessen wird. Während diese Methode messtechnisch einfach zu realisieren ist, scheidet die ebenfalls mögliche Erzeugung und Ermittlung von Längsresonanzschwingungen wegen des grossen Prüfaufwands als Sortiermethode aus (Erzeugung variabler Frequenzen).

Die longitudinale Ausbreitungsgeschwindigkeit von Spannungswellen wird durch verschiedene Faktoren (Holzfeuchte, Faserneigung) beeinflusst, die im praktischen Anwendungs-

fall entweder die Genauigkeit der Messung beeinträchtigen oder die durch zusätzliche Messungen erfasst und mittels Korrekturfaktoren berücksichtigt werden müssen. So verringert sich beispielsweise die Impulslaufzeit im hygroskopischen Bereich je Prozent Feuchteänderung um etwa 1%; bei einem Anstieg der Schrägfasrigkeit von 0 auf 30% sinkt die Ausbreitungsgeschwindigkeit je Prozent Faserabweichung um 1% bis 2% (Gerhards 1982a). Die Auswirkung von Ästen auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. den dynamischen E -Modul kann durch den Mittelwert aus zahlreichen Messungen über den Gesamtquerschnitt am besten erfasst werden (Gerhards 1982b).

Die Korrelationen zwischen den aus der Impulslaufzeit gerechneten dynamischen E -Moduln und den statischen E -Moduln liegen hoch, meist über 0,9 (Gerhards 1982a), so dass die longitudinale Impuls geschwindigkeit als Indikatorgrösse für die Holzfestigkeit (und auch Steifigkeit) geeignet erscheint, nicht zuletzt auch im Hinblick auf die verhältnismässig einfachen technischen Mittel, die für das Verfahren notwendig sind. Entsprechend den heutigen Erkenntnissen sind für einen Einsatz unter kontrollierbaren Bedingungen jedoch noch weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig.

Schallwellen

Während die Spannungswellen durch einen Stossimpuls induziert werden, erfolgt die Anregung der Schallwellen durch hochfrequente mechanische Schwingungen, die mittels Piezoelektrizität erzeugt werden. Die bei Holz angewendeten Frequenzen liegen im *Ultraschallbereich* von 40–60 kHz; zu ihrer Übertragung vom Sender aufs Holz (vor allem auf Hirnholzflächen) und wieder auf den Empfänger wurden früher pasten- oder kittartige Übertragungsmaterialien verwendet. Heute stehen Sonden zur Verfügung, die mecha-

nisch ins Holz eingepresst werden und ohne Übertragungsmaterialien arbeiten (Bild 3). Die wichtigsten Ultraschall-Prüfmethoden sind die *Durchschaltungs-* und die *Impuls-Echo-Methode*, mit denen teilweise unterschiedliche Materialeigenschaften erfasst werden. Während bei der ersten Methode Sender und Empfänger separat bzw. auf gegenüberliegenden Flächen aufgebracht werden, sind beim Impuls-Echo-Verfahren Sender und Empfänger in der gleichen Einheit integriert, was im Praxiseinsatz erhebliche Vorteile mit sich bringt. Ultraschall kann so auch an verbauten Konstruktionsteilen eingesetzt werden. Eine ganze Reihe von physikalischen Grössen lassen sich als Indikatorwerte erfassen: Impulslaufzeit, Eigenfrequenzen, Dämpfung, Reflexion, Frequenzspektrum, wobei der Impulslaufzeit die grösste Bedeutung zukommt. Ähnlich wie die verwandten Spannungswellen wird auch die Ausbreitung von Ultraschall durch verschiedene Parameter wie Holzfeuchtigkeit, Faserabweichungen (Astkonfiguration), Masseverteilung usw. beeinflusst. Während die Holzfeuchte im hygroskopischen Bereich durch experimentell ermittelte Koeffizienten berücksichtigt werden kann, besteht zwischen der Astigkeit und der Impulslaufzeit nur ein loser statistischer Zusammenhang; Sandoz (1989) ermittelte eine Korrelation von 0,48. Dies scheint ein Grund dafür zu sein, dass Waubke (1988) an Hochgebirgsfichten nur unzureichende Beziehungen zwischen den E -Moduln aus Ultraschall- und statischen Biegeverfahren feststellt, während weniger astige Hölzer von Flachlandstandorten mit Ultraschall-Impulslaufzeit-Messung (im Zusammenhang mit einer Dichtebestimmung) gut sortiert werden konnten. Ebenfalls mit einem tragbaren Gerät haben Klingsch und Neum (1989) mit Impulsdurchschallung äusserlich nicht sichtbare Holzschädigungen vor allem qualitativ nachgewiesen.

Insbesondere die an der ETH Lausanne durchgeführten Arbeiten (Sandoz 1989; Kessel, Sandoz 1989; Natterer, Sandoz 1987) sowie die Erkenntnisse von Waubke (1988) zeigen die prinzipiellen Möglichkeiten und Grenzen des Ultraschallverfahrens zur Sortierung von Bauholz auf. Zwar bedürfen die Korrelationen noch weiterer Bestätigungen, und messtechnische sowie methodische Verfeinerungen sind wünschbar (Bender et al. 1990). Generell scheint die Prüfapparatur jedoch ausreichend kompakt und beweglich zu sein, um sowohl stationär als auch vor Ort eingesetzt werden zu können, wobei die Kosten (<10 000 Fr.) auch für kleinere Betriebe der Holzindustrie

tragbar sind. Ein gegenwärtig am Institut für Stahlbau der ETH Zürich laufendes NFP-12-Projekt zum Thema Ultraschall-Sortierung lässt weitere Informationen über die Einsatz- und Aussagefähigkeit der Methode erwarten.

Durchstrahlungsverfahren

Die drei hier zusammengefassten Verfahren erfassen berührungsfrei physikalische Eigenschaften wie Masse, Dichteunterschiede und dielektrische Eigenschaften, die auf die Holzfestigkeit schliessen lassen.

Röntgen- und Kernstrahlung

Beide Strahlungsarten werden durch Masse in einem bestimmten Mass absorbiert. Da viele Strukturunregelmäßigkeiten des Holzes – insbesondere Äste, aber z.B. auch vermorschtes und von Insekten befallenes Holz – sich durch eine abweichende Dichte auszeichnen, ist eine Detektion mittels Durchstrahlung gut möglich.

Neueste Entwicklungen der Röntgenomografie machen es möglich, ein räumliches Bild von Struktureigenheiten des Holzes mittels Computer zu produzieren, abzuspeichern und in beliebigen Schnitten abzurufen. Damit kann ein Stamm mit seinen Strukturstörungen und Inhomogenitäten vollständig erfasst und digital verarbeitet werden. Der optimierte Einschnitt aufgrund dieser Daten ist damit lediglich die Frage einer entsprechenden gerätetechnischen Entwicklung (McMillin et al. 1984)

Die besonders geringe Streuung ist ein Vorteil der durch radioaktive Isotope erzeugten γ -Strahlen. Sie finden in einem Sortiermaschinentyp bereits praktische Anwendung und werden auch zur Überwachung der Span- und Faserplattenproduktion bzw. zur Erfassung der Stammgeometrie bei der Optimierung des Rundholzeinschnittes eingesetzt. Während bisher zur Ermittlung der Merkmale Rohdichte bzw. Astigkeit die Holzfeuchte und die Abmessungen des Prüfkörpers zusätzlich erfasst werden mussten, konnte Werner (1988) nachweisen, dass unterhalb des Fasersättigungsbereiches eine feuchteabhängige Sortierung nach dem Durchstrahlungsprinzip möglich ist.

Auch ohne genauere Analyse kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Werkstoff-Prüfungen auf der Basis von Röntgen- oder γ -Strahlen kaum jemals mit Handgeräten durchführbar sind, dies vor allem aus sicherheitstechnischen Gründen, aber auch wegen der damit verbundenen Kosten.

Mikrowellen (Hyperfrequenzradiometrie)

Bei den Mikrowellen handelt es sich um elektromagnetische Wellen mit Frequenzen von $10^8 \dots 10^{10}$ Hz. Gegenüber Ultraschall weisen die Mikrowellen verschiedene Vorteile auf, so z.B. die berührungsfreie Ankoppelung oder die Möglichkeit, mit den gleichen Fühlern (Antennen) ein breites Frequenzspektrum durchlaufen zu können. Da Holz nicht nur in seinen mechanischen, sondern auch in den elektrischen Eigenschaften anisotrop ist, verändern sich die mittels Mikrowellen nachweisbaren Eigenschaften (magnetische Permeabilität, Dielektrizitätskonstante, elektromagnetische Leitung) mit der Holzfeuchte und der Faserrichtung. Somit können einerseits Risse, Hohlräume und Strukturstörungen aufgrund der Streuung und Reflexion, andererseits Feuchte- und Dichteunterschiede über die Dämpfung der elektromagnetischen Wellen nachgewiesen werden (King 1978; James et al. 1985; Martin et al. 1987).

Bis zu einer breiten industriellen Anwendung der Mikrowellentechnologie oder einem gewerblichen Einsatz mit miniaturisierten Geräten dürfte noch ein sehr weiter Weg zu gehen sein. Dennoch deuten Entwicklungen an, dass diesem Verfahren eine grosse Chance eingeräumt werden muss, nicht zuletzt auch aus praktischer Sicht: keine gefährliche Strahlung, keine Ankoppelung, kein Aufbringen von Kräften, keine besondere Auflagerung der Prüflinge usw.

Optische Verfahren

Optische Verfahren können als jüngste Generation von Methoden zur industriellen Qualitätserfassung von Holz bezeichnet werden. Alle optischen Verfahren imitieren das menschliche Auge: Von der Oberfläche wird – mittels Laser-Scanning oder photooptisch – ein Bild erzeugt, das über Digitalisierungs- und Detektionsschritte im Computer analysiert wird. Entsprechend können alle an der Holzoberfläche unterscheidbaren Merkmale registriert werden: Äste, Risse, Verfärbungen. Unter Umständen kann jedoch nicht unterschieden werden, um welche Art von Störung es sich handelt. Kennzeichnend für alle bisherigen Systeme ist die Tatsache, dass sie mindestens ebenso sehr auf die Erfassung der Geometrie zwecks Schnittoptimierung ausgerichtet sind wie auf die Erfassung von Strukturstörungen bzw. Sortiermerkmalen.

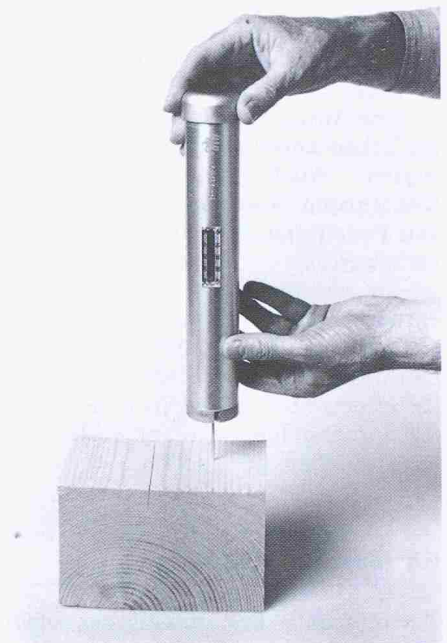


Bild 4. Pilodyn-Handgerät zur Messung der Penetrationstiefe eines 2,5 mm dicken Stahlstifts

Der Einsatz von optischen Prüfverfahren ist aus technisch/betrieblichen Gründen weder für einfache Sortiergeräte noch für Handgeräte denkbar.

Penetrationsverfahren (Pilodyn-Verfahren)

Beim Penetrationsverfahren wird ein zylindrischer Stahlstift von rund 2,5 mm Durchmesser mit einer bestimmten Energie (6 J) aus Federkraft max. 40 mm ins Holz eingeschossen (Bild 4). Aus der Eindringtiefe wird versucht, auf bestimmte Holzeigenschaften zu schliessen (Dichte, E-Modul, Festigkeit). Das Verfahren wurde zur Feststellung von Innenfäule bei Holzmasten entwickelt (Hoffmeyer 1978). Die Korrelationen, die zwischen der Pilodynpenetration und den Zielgrössen Dichte, E-Modul und Festigkeit erzielt wurden, sind sehr unterschiedlich. Während die Dichte bei Rundholzabschnitten in der Regel gut mit der Pilodyneindringung korreliert ($r: 0,9$), sind die Zusammenhänge bei Balken weniger gut ausgeprägt ($r: 0,56$) (Natterer, Sandoz 1987). Smith und Morell (1989) fanden beim Vergleich zwischen der Biegefestigkeit von Masten und der Pilodynpenetration in kleine, fehlerfreie Proben keine gesicherten Korrelationen. Orientierende EMPA-Untersuchungen an Schnittholz ergaben ebenfalls eine grosse Schwankungsbreite der Ergebnisse. Insbesondere scheint der Einfluss von Jahrringstellung (bzw. Eindringrichtung), Strukturstörungen und der Bedienungsweise für die Aussagefähigkeit wesentlich zu sein.

Das Gerät erfüllt sowohl vom Kostenrahmen her (~1000 Fr.) als auch durch seine Handlichkeit wesentliche Anforderungen einer apparativen Sortierhilfe. Eine Anwendung ist aufgrund heutiger Erkenntnisse zurückhaltend zu bewerten. Auch mit ausreichenden Kenntnissen über den Prognosewert von Penetrationsmessungen und einer verbesserten Anwendungstechnik scheint das Verhältnis zwischen Messaufwand und Interpretierbarkeit der Ergebnisse nicht optimal zu sein. Immerhin könnte das Pilodyn-Verfahren für vereinzelte Prüfungen und Kontrollen, insbesondere auch von verbautelem Holz, durchaus geeignet sein.

Härteprüfung (Equotip)

Zur einfachen Bestimmung der Oberflächenhärte von Metallen ist ein Verfahren bekannt, bei dem eine Stahlkugel mit bestimmter Geschwindigkeit und Energie auf eine Oberfläche geschossen wird. Gemessen werden induktiv Auf- und Rückprallgeschwindigkeit, aus denen unter bestimmten Bedingungen die Dichte bzw. der *E*-Modul abgeleitet werden können. Die Eignung eines Equotip-Gerätes zur Prüfung von Holz wurde an der EMPA durch einige orientierende Untersuchungen getestet. Mit den verwendeten Parametern ergaben sich nur unbefriedigende Korrelationen zur Festigkeit des Holzes. An sich würde auch dieses Verfahren die apparativen Voraussetzungen für eine einfache Sortierhilfe erfüllen. Das sogenannte Equotip-Gerät ist weniger kompakt als Pilodyn, aber leichter zu bedienen.

Feststellungen

In der nachfolgenden Tabelle sind die oben erwähnten Verfahren, ihr Einsatzgebiet und ihre Möglichkeiten zusammengefasst (Tabelle 1).

Aus der Zusammenstellung geht hervor, dass bestimmte Prüfmethoden eine Vielzahl von Holzcharakteristika erfassen können, während andere auf eine einzelne Eigenschaft ausgerichtet sind. Es ist offensichtlich, dass bei den ersteren die Frage der für die Güteerfassung wesentlichen Differenzierung eine ausschlaggebende Rolle spielt. Hier ist stets auch ein erheblicher Einsatz von Elektronik zu erwarten. Im Hinblick auf die Erfassung des *E*-Moduls weisen die mechanischen Verfahren eindeutige Vorteile auf, während die Dichte durch physikalische Methoden besser zu erfassen ist. Da Äste im allgemeinen eine höhere Dichte als das sie umgeben-

de Holz aufweisen (insbesondere bei Nadelholz), lassen sie sich mit physikalischen Methoden gut nachweisen. Auch mit dem Ultraschall-Verfahren, das im Grenzbereich zwischen mechanischen und physikalischen Methoden steht, ist dies unter gewissen Voraussetzungen möglich.

Generell muss festgestellt werden, dass sich von den anerkannten Prüfmethoden nur jene für einen Einsatz als apparative Sortierhilfe eignen, die auf einer Impulslaufzeitmessung beruhen.

Für die meisten Verfahren, die in den Tabellen als prinzipiell geeignet eingestuft wurden, ist bis zu einer eventuellen Einsatzreife mit einem grossen Entwicklungsaufwand zu rechnen. Dies betrifft im allgemeinen sowohl die Gerätetechnik als auch die Anwendungstechnik. Ein langer Entwicklungsweg bedeutet jedoch auch, dass mit einer Anwendbarkeit (in Berücksichtigung sämtlicher relevanten Gesichtspunkte) nicht sicher gerechnet werden kann. Ob sich ausländische Entwicklungen, die zur Hauptsache für den grosstechnischen Einsatz konzipiert werden, auf die schweizerischen Verhältnisse übertragen lassen, muss im Einzelfall überprüft werden.

Neben den apparativen Sortierhilfen ist eine Entwicklung auch in Richtung «einfache Sortiermaschinen» denkbar, d.h. stationäre, einfachere Geräte, die den Schweizer Verhältnissen entsprechen würden. Hier ist die Bandbreite technisch geeigneter Verfahren grösser. Allerdings wird die Akzeptanz zukünftig zu erwartender Entwicklungen für die einheimische Holzindustrie wesentlich vom Kostenrahmen bestimmt werden.

Zusammenfassend führen die vorliegenden Untersuchungen, bei denen die apparativen Sortierhilfen im Vordergrund standen, zur Feststellung, dass z.Zt. auf dem Markt keine einsatzreife apparative Sortierhilfe existiert, die das Anforderungsprofil vollumfänglich erfüllt. Der Problemlösung am nächsten kommt gegenwärtig die Impuls-Laufzeitmessung, die jedoch auch noch weiterer Optimierungen bedarf.

Alle übrigen Methoden sind trotz vielversprechenden Ansätzen eindeutig weiter von der praktischen Realisierbarkeit entfernt, sei es apparativ oder von der Anwendungsmethodik und Anwendungserfahrung her (einschliesslich versuchsmässiger Ermittlung der quantitativen Zusammenhänge zwischen den interessierenden Grössen). Grundsätzlich wird eine Miniaturisierung von gängigen Verfahren zwecks Entwicklung von apparativen Sortierhilfen – ebenso wie das Erproben von vollständig neuen Verfahren –

als wenig erfolgversprechend und insbesondere auch als sehr aufwendig beurteilt. Zweckmässiger scheint es, bestehende Geräte, die das Anforderungsprofil einigermaßen erfüllen, weiterzuentwickeln.

Die praktische Realisierbarkeit eines Verfahrens hängt ausser von den gerätetechnischen Anforderungen und vom Aussagewert der Messgrössen zu einem guten Teil auch von den notwendigen Entwicklungsaufwendungen ab, die zur Erzielung der Praxisreife zu investieren sind. Es ist augenscheinlich, dass marktwirtschaftlich sehr bald Grenzen erreicht sind, wenn die hohen Entwicklungskosten einem realistischen Verkaufspreis, der möglichen (eher geringen) Stückzahl der absetzbaren Geräte sowie den entsprechend hohen Produktionskosten gegenübergestellt werden. Aus dieser Perspektive sind schweizerischen Sonderlösungen eher wenig Chancen einzuräumen.

Abschliessende Bemerkungen

Ausgehend von einem Auftrag des schweizerischen Nationalfonds, die Möglichkeit zu untersuchen, wie mit apparativen Hilfsmitteln die Sortierung von Bauholz verbessert werden könnte, wurden in dieser Artikelserie die Sortierung und Qualität von Bauholz in ihren weiteren Zusammenhängen beleuchtet. Dabei wurde einerseits das ausgewiesene Bedürfnis nach einer effizienteren Sortierung den technischen Möglichkeiten gegenübergestellt, andererseits wurden die wirtschaftlichen und betrieblichen Randbedingungen beleuchtet.

Verschiedene Ansätze der Problemlösung befinden sich auf den unterschiedlichsten Stufen der Entwicklung und Forschung; weitere Bemühungen sind notwendig und sinnvoll. In welche Richtung die Entwicklung längerfristig gehen wird, ist schwierig abzuschätzen.

Unabhängig von einer dannzumal eingesetzten Technologie wird es zweifellos unerlässlich sein, für die Übereinstimmung mit den massgeblichen Normen besorgt zu sein, ist doch vor allem in den sicherheitsrelevanten Bereichen – wozu eine Holz-Festigkeitssortierung auch gehört – die «Regelungsdichte» verhältnismässig hoch. Im Licht der derzeitigen europäischen Entwicklung liegt es auf der Hand, dass die für die Festigkeitssortierung massgebenden Normen nicht schweizerische, sondern europäische Normen sein werden; bereits jetzt kann die Schweiz aufgrund der heutigen Verpflichtungen und Gegebenheiten (Mitgliedschaft im Comité Européen de Normalisation/CEN,

| Prüfverfahren | Gemessene Eigenschaften | Primär zu erfassende Holzcharakteristika | | | | | | | | | | Technische Vorteile | Nachteile | Mögliche Eignung als einfaches, stationäres Sortiergerät | Mögliche Eignung als apparative Sortierhilfe | Geschätzter Entwicklungsbedarf | | |
|---|--|--|---------|------|-------------------|---------|-------|-----------|------------|--------------|-------------|---------------------|-----------|--|--|--------------------------------|------------|---------------|
| | | Dichte | E-Modul | Äste | Schrägfaserigkeit | Feuchte | Risse | Geometrie | Verfärbung | Vernorschung | Hohlstellen | | | | | | Mikrorisse | Festigkeit |
| <i>Biegeverfahren</i> • Statische Biegeprüfung • Prüflastverfahren • Prüflast, Schalldetektion | Verformung | + | | | | | | | | | | | | | | | | 0...2 |
| | Verformung, Festigkeit | + | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| | Schallemission | + | | | | | | | | | | | | | | | | 5 |
| <i>Schwingungsverfahren</i> • dynamische Biegeprüfung • Spannungswellen • (Ultra)-Schallwellen | Eigenfrequenz | + | | | | | | | | | | | | | | | | 1...2 |
| | Impulslaufzeit | + | | | | | | | | | | | | | | | | 3 |
| | Impulslaufzeit, Eigenfrequenz, Dämpfung, Reflexion | + | | | | | | | | | | | | | | | | 1...3 (4...5) |
| <i>Durchstrahlungsverfahren</i> • Röntgenstrahlen • Kernstrahlung, Strahlung • Mikrowellen | Masse/Dichteunterschiede | + | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Masse/Dichteunterschiede | + | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | unterschiedl. dielektrische Eigenschaften | + | | | | | | | | | | | | | | | | 5 |
| <i>Optische Verfahren</i> | unterschiedl. Lichtreflexion | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Eindringtiefe | (+) | (+) | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| <i>«Härteprüfung»</i> | rel. Rückprallgeschwindigkeit | (+) | (+) | | | | | | | | | | | | | | | 2 |

+ gut geeignet (+) bedingt geeignet (-) wenig geeignet - nicht geeignet ± Einsatz nach technischer Entwicklung möglich

Tabelle 1. Prüfverfahren zur Erfassung von Holzcharakteristika

CEN-Normierungsaktivitäten im Sortierungsbereich; Stillhalteabkommen) keine neuen Holzbaunormen, einschliesslich Sortiernormen, erstellen.

Besonders erwähnenswert in diesem Zusammenhang sind die Aktivitäten der Arbeitsgruppe 2 des CEN-Technischen Komitees 124, Massivholz, die – unter anderem – zu einer Norm über Maschinensortierung und maschinensortiertes Holz führen wird. Auch die revidierte DIN 4074 (1989) normiert im übrigen neu die maschinelle Festigkeitsortierung.

Im weiteren ist auf die auf ihre Art neuartige CEN-Norm über die Auswertung von Versuchsergebnissen und Herleitung von charakteristischen Eigenschaftswerten sowie auf die CEN-Norm über Festigkeitsklassen hinzuweisen. Es ist zu hoffen, dass zumindest langfristig ein kohärentes System Material/Materialprüfung/Materialeigenschaften/gesicherte Bemessungswerte usw. erzielt wird.

Für die Anwendbarkeit des Holzes als tragender Baustoff ist es wichtig, dass sich der Ingenieur für ein bestimmtes Holzsortiment auf ein Profil von abgesicherten Werten von mechanischen Eigenschaften abstützen kann: Biegefestigkeit, Zug- und Druckfestigkeit längs und quer zur Faser, Schubfestigkeit, Verformungsmoduln usw. Die erwähnte zukünftige Euronorm über Festigkeitsklassen enthält solche sortimentsbezogene Eigenschaftsprofile.

Die hier diskutierten Sortiermethoden – bzw. das sortimentsbezogene Erfassen von bestimmten Materialcharakteristika – können im Hinblick auf die gesuchten Eigenschaftsprofile je nach Methode nur sehr spezifische Aussagen gewährleisten, d.h., ein Schluss auf das gesamte Eigenschaftsprofil ist nicht a priori zulässig. Dies ist bei der Definition von neuen Sortimenten zu beachten.

Adresse der Verfasser: U. Meierhofer, K. Richter, Abteilung Holz der EMPA, 8600 Dübendorf.

Literatur

- Ansell, M.P.* 1982. Acoustic emissions from softwoods in tension. *Wood Sci. Techn.* 16: 35–58
- Atherton, G.H.* 1980. Preliminary study of proportional limit as predictor of ultimate strength in bending. *Forest Prod. J.* 30(11): 47–53
- Bender, D.A., Burk, A.G., Taylor, S.E., Hooper, J.A.* 1990. Predicting localized MOE and tensile strength in solid and finger jointed laminating lumber using longitudinal stress waves. *Forest Prod. J.* 40(3): 45–49
- Cown, D.J.* 1978. Comparison of Pilodyn and Torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *New Zealand J. of Forestry Sci.* 8: 384–391
- Gerhards, Ch.C.* 1982a. Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art. *Forest Prod. J.* 32(2): 20–25
- Gerhards, Ch.C.* 1982b. Effect of knots on stress waves in lumber. *USDA For. Serv. Res. Pap. FPL 384*, 28 S.
- Glos, P.* 1983. Die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten der Schnittholzsortierung im Mittel- und Kleinbetrieb. *SAH-Bull.* 1983/1: 13–35
- Glos, P., Schulz, H.* 1980. Stand und Aussichten der maschinellen Schnittholzsortierung. *Holz Roh/Werkstoff* 38: 409–417
- Govers, A.* 1968. The relationship between modulus of rupture and modulus of elasticity in European whitewood (spruce and fir) of structural sizes. *Hout instituut TNO, Delft*
- Hoffmeyer, P.* 1978. The Pilodyn instrument as a nondestructive tester of the shock resistance of wood. *Proc. 4th Nondestructive Testing of Wood Symp. Vancouver, Wash.:* 47–66
- Hoyle, R.J.* 1968. Background to machine stress grading. *Forest Prod. J.* 18(4): 87–97
- James, W.L., Yen, Y., King, J.R.* 1985. A microwave method for measuring moisture content, density, and grain angle of wood. *USDA For. Serv. Res. Note FPL-0250*, 9 S.
- Kessel, M.H., Sandoz, J.L.* 1989. Zur Effizienz der Festigkeitssortierung von Fichtenkantholz. Einfluss der Klassengrenzen. *Holz Roh/Werkstoff* 47: 323–327
- King, R.J.* 1978. Microwave electromagnetic nondestructive testing of wood. *Proc. 4th Nondestructive Testing of Wood Symp. Vancouver, Wash.:* 121–134
- Klingsch, W., Neum, U.* 1989. Zerstörungsfreie Lokalisierung äusserlich nicht sichtbarer Holzschädigungen mittels Ultraschall. *Bauen mit Holz* (6): 421–423
- Knuffel, W.E.* 1988. Acoustic emissions as strength predictor in structural timber. *Holzforschung* 42: 195–198
- Kollmann, F., Krech, H.* 1960. Dynamische Messungen der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. *Holz Roh/Werkstoff* 18: 42–54
- Madson, B.* 1978. In-grade testing – problem analysis. *Forest Prod. J.* 28(4): 42–50
- Martin, P., Collet, R., Barthelomy, P., Roussy, G.* 1987. Evaluation of wood characteristics: Internal scanning of the material by microwaves. *Wood Sci. Technol.* 21: 361–371
- McMillin, Ch. W., Connors, R.W., Huber, H.A.* 1984. ALPS – A potential new automated lumber processing system. *Forest Prod. J.* 34(1): 13–20
- Morgener, W., Niemz, P., Theis, K.* 1980. Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Bruch- und Kriechvorgängen in Werkstoffen aus Holz. *Holztechnol.* 21: 77–82
- Natterer, J., Sandoz, J.L.* 1987. Evaluation des caractéristiques physiques et mécaniques des bois sciés, avec des méthodes non destructives. *EFPL/IBOIS, Rapport No. 4.756.1.84.12*, 47 S. + Anhang
- Niemz, P.* 1989. Zur Anwendung der Schallemissionsanalyse in der Holzforschung. *Holz-Zentralblatt* 112: 1704
- Sandoz, J.L.* 1989. Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Sci. Technol.* 23: 95–108
- Smith, S.M., Morell, J.J.* 1989. Comparing full-length bending strength and samll scale test strength of western redcedar poles. *Forest Prod. J.* (39)9: 29–33
- Schöne, W.* 1989. Einige Grundlagen der zerstörungsfreien Prüfung von Brett-schichtholz. *Holztechnol.* 30: 65–69
- Vinopal, G.W.* 1980. Determination of the combined influence of density and knots on the mechanical properties of full-size structural timber. Paper presented at the meeting of Subject Group, S5.02, IU-FRO
- Walters, E.O., Westbrook, J.* 1970. Vibration machine grading of southern pine dimension lumber. *Forest Prod. J.* (20)5: 24–32
- Waubke, N.* 1988. Einsatz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Sortierung von Bauhölzern. *Bauen mit Holz* (3): 152–154
- Werner, G.* 1988. Untersuchungen an Fichtenholz über das Verhältnis der Rohdichte im Astbereich zu der Rohdichte im astfreien Bereich mit Überprüfung der Klassengrenzen bei der maschinellen Sortierung von Schnittholz nach dem Durchstrahlungsprinzip. *Kurzbericht aus der Bauforschung, Bericht 117*, S. 463–466