

Mechanische Eigenschaften und Dichte frischer Hölzer

Zu: J. A. PFISTERER und H.-C. SPATZ in AFZ-DerWald 8/2012 S. 41-45.

Georges Lesnino

In ihrem Beitrag greifen die Autoren auf Messdaten aus verschiedenen Tabellenwerken (JESSOME, LAVERS und Wood Handbook USDA) zurück, um den Einfluss der Holzdicke von grünen Hölzern aus weltweit wachsenden Bäumen auf ihre mechanischen Eigenschaften zu demonstrieren. Es ergibt sich, so die Autoren, „eine signifikante Korrelation zwischen physikalischen Messgrößen und der Holzdicke“. Da bei den im Stuttgarter Festigkeitskatalog [12] angegebenen mechanischen Eigenschaften der grünen Hölzer keine Korrelation gefunden wurde, stellen PFISTERER und SPATZ diese Daten infrage.

Aufgrund der breiten Schwankungen der Holzdichten sowohl innerhalb eines Baumes als auch innerhalb einer Baumart sowie aufgrund der Problematik der Dichtebestimmung und Prüfung der mechanischen Holzeigenschaften von grünen Hölzern sollte diese pauschale Aussage relativiert werden.

Bei der Lektüre des o.g. Artikels fällt zuerst auf, dass keine der weltweit anerkannten deutschsprachigen Holzforscher wie z.B. KOLLMANN, KNIGGE oder BOSSHARD hier zitiert wurden. In unzähligen Veröffentlichungen und Lehrbüchern dieser Forscher findet man Arbeiten, in denen der Zusammenhang zwischen Holzdicke, Holzfeuchte und verschiedenen mechanischen Holzeigenschaften untersucht wurde. Generell wird in diesen Veröffentlichungen eine enge Beziehung festgestellt [4]. Also nichts Neues?

Holzdicke ist nicht Holzdicke

Die Methodik der Prüfung der mechanischen Holzeigenschaften ist durch DIN-

Normen (z. B. DIN 52 182 1976-09 Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdicke, DIN 52 185 1976-09 Prüfung von Holz – Bestimmung der Druckfestigkeit¹⁾ parallel zur Faser) genau reglementiert. In den entsprechenden DIN-Normen sind auch die verschiedenen Holzdichten klar definiert. Im deutschsprachigen Raum unterscheidet man zwischen **Darrdichte**, **Rohdicke** und **Reindichte** [g/cm³]. Die Darrdicke ist das Gewicht des darrgetrockenen Holzes, bezogen auf das Volumen des darrgetrockenen Holzes, während die Rohdicke bei bestimmten Holzfeuchten z.B. 12 oder 15 % als Gewicht des Holzes in Bezug auf sein Volumen in dem entsprechenden Feuchtezustand angegeben wird. Die Reindichte ist das Gewicht der reinen Holzsubstanz zu ihrem Volumen und beträgt über alle Holzarten durchschnittlich 1,5 g/cm³.

Die Bestimmung der Dichte von grünen Hölzern bereitet allerdings Probleme, da das freie, in der Holzwand nicht gebundene Wasser bei der Prüfung der mechanischen Holzeigenschaften nicht zur Holzsubstanz gerechnet werden kann. Deshalb wird die Raumdichte [kg/m³] als Gewicht des darrgetrockenen Holzes in Bezug auf das Volumen des vollgequollenen (grünen) Holzes bestimmt.

Holzfeuchte, Holzdicke, Holzfestigkeit

Die Holzfeuchte wird als Gewichtsprozent des Wassergehaltes (Gewichtsunterschied zwischen feuchtem und darrgetrockenem

Holz) im Verhältnis zum Gewicht des darrgetrockenen Holzes berechnet.

Im vorliegenden Beitrag wurden Dichtewerte als Rohdichten bei 15 % Holzfeuchte (r_{15}) oder Raumdichten benutzt, die an Proben von frischen (grünen) Hölzern gemessen worden sind. Diese Dichtewerte wurden, wie im Artikel erläutert, auf eine Holzfeuchte von 50 % „mittels eines Faktors 1,5“ umgerechnet. Hier wird nicht weiter erläutert, ob Rohdichten und Raumdichten getrennt auf verschiedene Weise umgerechnet wurden. Da eine Holzfeuchte von 50 % die Fasersättigungsfeuchte je nach Holzart mehr oder weniger deutlich überschreitet, dürfte eine pauschale Umrechnung mittels eines Faktors über alle Holzarten – ob dichten oder weniger dichten – unzulässig sein. Freies Wasser in einem offenen System, wie es ein Holzprüfkörper darstellt, trägt nichts.

Bekannt ist, dass mit zunehmender Holzfeuchte oberhalb der Fasersättigungsfeuchte, die nach TREDELENBURG [11] je nach Holzart zwischen 22 und 35 % liegt, die physikalischen (z.B. Quellung) und mechanischen Holzeigenschaften (z.B. Druckfestigkeit) mehr oder weniger konstant bleiben [4].

Die mechanischen Holzeigenschaften nehmen mit zunehmender Holzfeuchte bis zum Fasersättigungspunkt ab [2, 4]. Dies bedeutet, dass der Einfluss der Dichte mit zunehmender Holzfeuchte schwächer wird. Dies lässt sich dadurch erklären, dass eine Wasseraufnahme in der Zellwand zu einer Hydratation der OH-Gruppen der Zellulose und Hemizellulose sowie des Lignins führt [1]. Dies bewirkt eine Auflockerung der Zellwandgerüsts aus Zellulosemikrofibrillen und somit eine Abnahme der Holzfestigkeit v.a. der Druckfestigkeit in Faserrichtung (Längsdruckfestigkeit). Zusätzlich vergrößert sich der Lastquerschnitt infolge der Quellung, sodass sich die Druckspannung, bezogen auf die Flächeneinheit, verringert.

¹⁾ Hier muss richtiggestellt werden, dass im deutschsprachigen Raum die von Pfisterer und Spatz verwendete Bezeichnung „Kompressionsfestigkeit“ kein mechanischer Begriff im Sinne der Druckfestigkeit ist.

Dipl.-Forstwirt (Uni)
Dr. G. Lesnino ist als
öffentlich bestellter
und vereidigter
Sachverständiger
für Baumpflege,
Verkehrssicherheit
von Bäumen und
Jahresringanalyse tätig.



Georges Lesnino
lesnino@baum-expert.de

Um diese Verhältnisse zu veranschaulichen, sind die Ergebnisse einer Korrelationsberechnung für den Zusammenhang zwischen Holzdicke und Längsdruckfestigkeit in Abb. 1 dargestellt. Die für die Berechnung benutzten Messwerte von darrtrockenen Hölzern stammen aus KNIGGE und SCHULZ [3], die Messwerte von frischen Hölzern aus NIKLAS und SPATZ [6]. Es wurden Baumarten bzw. -gattungen ausgewählt, bei denen Messwerte in beiden Quellen zur Verfügung standen. Aus der Steigung der jeweiligen Regressionsgeraden ist ersichtlich, dass der Einfluss der Dichte auf die Längsdruckfestigkeit der grünen Hölzer (Steigung = 0,036) viel schwächer – sogar nicht mal halb so stark – ist als für darrtrockene Hölzer (Steigung = 0,075). Folglich dürfte die Holzfeuchte einen größeren Einfluss auf die Holzfestigkeit von grünen Hölzern ausüben als ihre Holzdicke. Demzufolge sollte die von PFISTERER und SPATZ berechnete „signifikante Korrelation zwischen physikalischen Messgrößen und der Holzdicke“ relativiert werden.

Wie PFISTERER und SPATZ in ihrem Beitrag richtig stellen, beeinflussen viele Faktoren die Holzdicke. Die Holzdichten einer Holzart können so stark variieren, dass ein Mittelwert nur über eine Häufigkeitsverteilung bei ausreichend großen Probenkollektiven repräsentativ sein kann [1]. Unter den Einflussfaktoren sind Jahrringbreite, Früh- bzw. Spätholzanteil und Vorkommen von Reaktionsholz als Zug- bzw. Druckholz zu nennen. Bei ringporigen Holzarten wie Eiche, Esche oder Robinie schwankt die Darrdicke (r_0) erheblich, für die Eiche beispielsweise zwischen 0,38 und 0,90 g/cm³ [8]. Hier hat die Jahrringbreite einen großen Einfluss auf den Spätholzanteil (dichtere Holzschicht im Jahrring) und somit auf die Holzdicke: schnell wachsende ringporige Baumarten bilden deutlich mehr Spätholz als langsam wachsende wie z.B. die wertvollen Spessart-Furniereichen. Bei Nadelbäumen liegen umgekehrte Verhältnisse vor. Ein junger Solitärbaum bildet breite Jahrringe, bei einem alten Baum nimmt der Radialzuwachs im äußeren Splintbereich deutlich ab. Zwischen den inneren Stammbereichen und den äußeren Splintholzonen von ringporigen Baumarten und Nadelbaumarten sind folglich deutliche Dichteunterschiede zu verzeichnen. Dies al-

les bedeutet, dass ein weltweiter Vergleich dieser Zusammenhänge, bei dem das Holz aus verschiedenen Stammbereichen sowie von Bäumen aus verschiedenen Klimazonen, Standorten und Baumarten geprüft wurde, nicht fundiert und nicht vertretbar ist. Auch ein Vergleich dieser Daten mit den im Stuttgarter Festigkeitskatalog [12] angegebenen Festigkeitswerten, die an Holzproben aus dem äußeren baumstatisch relevanten Splintbereich ermittelt wurden, ist aus diesen Gründen nicht zulässig.

Bei der Prüfung der mechanischen Holzeigenschaften sind normierte Prüfbedingungen erforderlich. Werden verschiedene Prüfkörpergrößen oder Lastvorschubgeschwindigkeiten verwendet, können sich erhebliche Unterschiede ergeben. Beispielsweise wurde die Längsdruckfestigkeit bei LAVERS [6] mit einem Vorschub von 0,01 mm/s, bei WESSOLLY [12] mit einem Vorschub von 1 mm/s gemessen. Deshalb ist ein Vergleich von Messwerten, die mit unterschiedlichen Prüfbedingungen erzielt wurden, wiederum nicht zulässig. Ferner hat LAVERS die Längsdruckfestigkeit als maximale Druckspannung ermittelt. Bei WESSOLLY wurde die Längsdruckfestigkeit als Spannung, ähnlich wie die zulässige Spannung für Bauholz, beim Erreichen der Elastizitätsgrenze (Proportionalitätsgrenze) – also niedrigere Spannung – gemessen. Hierdurch ergeben sich wiederum erhebliche Unterschiede.

In ihrem Beitrag vertreten die Autoren PFISTERER und SPATZ die Auffassung, dass die maximale Längsdruckfestigkeit statisch relevant sei, da sich bei den Testprüfungen eine gute Übereinstimmung zwischen maximalen Längsdruckfestigkeiten und Biegefestigkeiten ergebe. Aber lässt sich diese Auffassung auf einen Baum oder auf

ein Holzbauwerk übertragen? Die Festigkeit bezeichnet die maximale Spannung, die ein Holzkörper bis zum Bruch aufnehmen kann. Mit zunehmender Last wird das Holz zunächst reversibel elastisch verformt. Bei Überschreitung der Elastizitätsgrenze treten bekanntlich irreversible Kriechvorgänge (Faserstauchungen, möglicherweise auch Mikrorisse) als Primärversagen auf. Es handelt sich somit um eine Vorschädigung, die die Bruchsicherheit bei erneuten wiederkehrenden Windbelastungen mehr oder weniger stark beeinträchtigen dürfte. Wollen wir es dann dem Zufall überlassen, ob bei einem späteren Sturm der vorgeschädigte Stamm oder Stämming noch bruchfest genug ist oder nicht mehr?

Zugversuche

Zur Ermittlung der Stammbruchsicherheit werden Zugversuche an stehenden lebenden Bäumen durchgeführt [12, 10]. In der Tat gehen mechanische Holzeigenschaften von grünen Hölzern wie Längsdruckfestigkeit, Elastizitätsgrenze und Biege-E-Modul aus dem Stuttgarter Festigkeitskatalog in die Berechnung ein. Die Längsdruckfestigkeit dient zur Berechnung der theoretischen Grundsicherheit nach Windlastanalyse, die Elastizitätsgrenze zur Berechnung der Bruchsicherheit nach Elastometer-Messungen und das Biege-E-Modul zur Ermittlung der Resttragfähigkeit im Vergleich zum Vollstamm.

Zugversuche zur Ermittlung der Bruchsicherheit von Bäumen werden in erster Linie an älteren, besonders erhaltungswerten, stark vorgeschädigten Bäumen durchgeführt, die man nach Möglichkeit erhalten möchte. Werden Druckfestigkeitswerte als

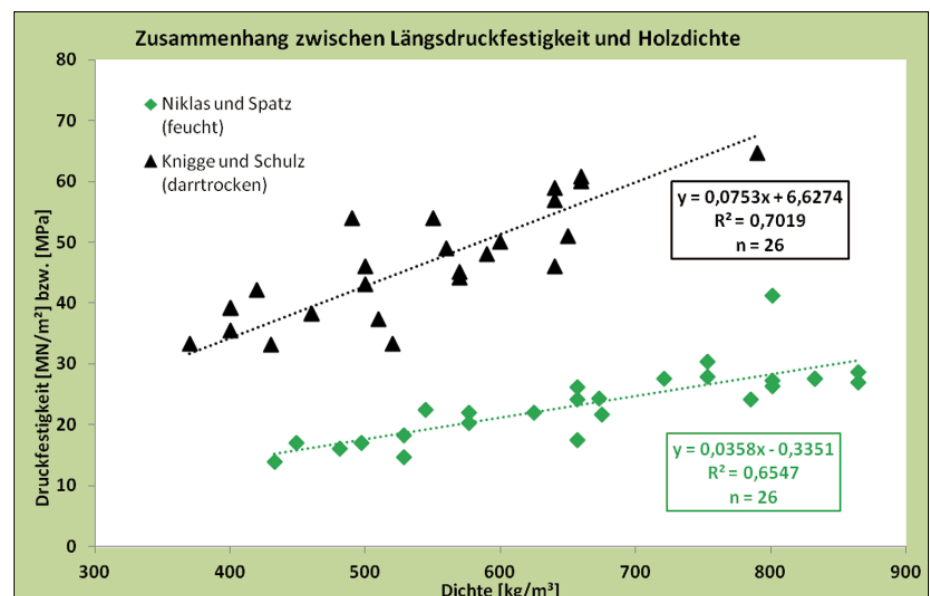


Abb. 1: Korrelation zwischen der Holzdicke und der Längsdruckfestigkeit nach KNIGGE und SCHULZ [3] für darrtrockene Hölzer und nach NIKLAS und SPATZ [6] für grüne Hölzer

maximale Druckfestigkeiten in die statische Berechnung eingesetzt, wird der Baum wesentlich sicherer gemacht als er tatsächlich ist. Beispielsweise kann eine Erhöhung der Druckfestigkeit von 2,5 auf 3,0 MN/m² zu einer Erhöhung der theoretischen Grundsicherheit um 25 % bedeuten. Gleiches gilt beim Einsetzen höherer Elastizitätsgrenzen. Rechnerisch würde es zu einer erheblichen Verringerung des Sicherheitsfaktors und somit der Sicherheitsreserven des geprüften Baumes führen. Können die Autoren dafür geradestehen?

Zugversuche bis zum Stammbruch wurden in den letzten Jahren an einzelnen Bäumen verschiedener Baumarten versuchsweise durchgeführt [7, 9]. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Bruchspannung nur anhand von Dehnungsmesswerten, die unter geringer Spannung (unterer elastischer Bereich) erzielt wurden, relativ genau prognostiziert werden kann. Für diese Berechnungen wurden die mechanischen Holzeigenschaften von grünen Hölzern aus dem Stuttgarter Festigkeitskatalog verwendet. In einem Methodenvergleich zwischen Impulstomografie und Elasto-Methode konnte zudem eine enge Korrelation zwischen dem aus den Tomogrammen berechneten

Restwiderstandsmoment und der aus Elastometer-Messungen ermittelten Resttragfähigkeit des Baumstammes nachgewiesen werden [5]. Belege dafür, dass die Werte aus dem Stuttgarter Festigkeitskatalog nicht völlig falsch sein können!

Die Autoren kritisieren schließlich die Methodik der Windlastanalyse, da „meist stark vereinfachte Annahmen in überschaubare Formeln eingesetzt“ werden, ohne Berücksichtigung z.B. der Verteilung und Absorption der Windenergie innerhalb der Krone. Es müsste jedem bewusst sein, dass Windverhältnisse und die Windlasten, die in einem Baum übertragen werden, schwer sogar unmöglich genau zu berechnen sind. Sicherheitsberechnungen sollten aber den extremen Fall wie z.B. Orkanböen, die überall auch in Mitteleuropa punktuell, plötzlich und zunehmend auftreten können, mit einbeziehen. Bei der statischen Berechnung der Tragfähigkeit eines Hallendaches wird auch z.B. eine zusätzliche Belastung durch eine Schneedecke mitberücksichtigt. Unter Verwendung eines Sicherheitsfaktors von 1,5 und der zulässigen Spannung als Längsdruckfestigkeit wird bei der statischen Auswertung der Bruchsicherheit von Bäumen eine verantwortliche Sicherheitsberechnung

angestrebt, die sich auf eine möglichst maximale Risikominimierung orientiert, mit dem Ziel, vorgeschädigte Bäume unter Berücksichtigung der Verkehrssicherheit erhalten zu können. Die Inclino-Elasto-Methode hat sich schließlich jetzt nach 25 Jahren mit mehr als 10 000 Sicherheitsgutachten, die alle in der SIM-Gruppe archiviert sind, bewährt [13].

Literaturhinweise:

- [1] BOSSHARD, H. H. (1984): Holzkunde. Bd. 2. Basel – Boston – Stuttgart: Birkhäuser Verlag. [2] Forest Products Laboratory (2010): Wood handbook – Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. [3] KNIGGE, W. und SCHULZ, H. (1966): Grundriss der Forstbenutzung. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey. [4] KOLLMANN, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Bd. 1. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer-Verlag. [5] LESNINO, G. (2011): Methodenvergleich Elastomethode und Schalltomografie. Tagungsband BaumtageSüd 2011, 103-110. [6] NIKLAS, K. und SPATZ, H.-C. (2010): Worldwide correlation of mechanical properties and green wood density. Am. J. Bot. 72, 173-179. [7] PROSENZ, R. (2010): Baumbruch in Tulln – Baumstatik, der Zugversuch. <http://www.svprosenz.at/tulln/index.php> [8] SCHULZ, H. (1959): Untersuchungen über Bewertung und Gütemerkmale des Eichenholzes aus verschiedenen Wuchsgebieten. Schriftenr. D. Forstl. Fak. D. Univ. Göttingen. Bd. 23. Frankfurt/M.: Sauerländer's Verlag. [9] SIEGERT, B. (2011): Vergleichende Untersuchungen von Geräten und Methoden zur Beurteilung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. Tagungsband BaumtageSüd 2011, 147-182. [10] SINN, G. (2003): Baumstatik. Braunschweig: Thalacker Medien. [11] TRENDELENBURG, R. (1939): Das Holz als Rohstoff. München: J. F. Lehmanns Verlag. [12] WESSOLLY, L. und ERB, M. (1998): Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Berlin: Patzer Verlag. [13] WESSOLLY, L. (2010): 25 Jahre Baumstatik – Eine Bilanz. Pro Baum 3/2010, 9-15.