

H. J. Blaß · M. Frese

Sortierverfahren für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung

Online veröffentlicht: 7 Juli 2004
© Springer-Verlag 2004

Zusammenfassung Eine kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung soll mit geringem zusätzlichen Sortieraufwand gegenüber der aktuellen Praxis der visuellen Sortierung und niedrigen Investitionskosten für den Betreiber eine Einstufung von Brettlamellen und Kanthölzern aus Nadelholz in die Festigkeitsklasse C35 nach EN 338 ermöglichen. Es werden kombinierte Sortierverfahren ausgearbeitet, die neben visueller Sortierung verschiedene Parameter im Bereich der maschinellen Festigkeitsvorhersage berücksichtigen. Neben den Querschnittsmaßen sind das vor allem die Bruttorehdichte (= Masse des Schnittholzes geteilt durch sein Volumen) und der dynamische E-Modul, der u. a. aus der Schwingungszeit einer Längsschwingung berechnet wird. Anhand von Sortierergebnissen wird gezeigt, dass kombinierte Verfahren, die in der maschinellen Komponente die Bruttorehdichte und/oder den dynamischen E-Modul von trockenem oder frischem Holz benötigen, zuverlässige Hilfsmittel für die Festigkeitsvorhersage für Schnittholz darstellen.

Combined visual and machine strength grading

Abstract The aim of this study was to show the possibility of the classification of structural timber into strength class C35 according to EN 338 by using combined visual and machine strength grading techniques. Three different visual-machine strength grading combinations are devised for allocating sawn timber into strength class C35. They are composed on the one hand of the visual grading according to DIN 4074-1 and on the

Die vorliegende Arbeit wurde finanziell gefördert durch die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. mit Mitteln des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) in Berlin. Die Autoren danken an dieser Stelle für die freundliche finanzielle Unterstützung.

H. J. Blaß (✉) · M. Frese
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen,
Universität Karlsruhe,
Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe, Deutschland
E-Mail: hans.blass@holz.uka.de
Fax: +49-721-6084081

other hand of machine strength grading of green or dry sawn timber by measuring the dynamic MOE or the apparent density of sawn timber. In order to allocate sawn timber into strength class C35 the machine settings for these combinations were estimated. The grading results show that combinations based on the dynamic MOE are suitable for strength grading of lamellae for glued laminated timber and joists. Combinations based on apparent density are also suitable for strength grading lamellae for glued laminated timber.

1 Einleitung

Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von unsortiertem Schnittholz streuen in weiten Bereichen. Dafür gibt es zwei wesentliche Gründe. Zum einen ist das Stammholz ein von der Natur hervorgebrachter Rohstoff, dessen physikalische und mechanische Eigenschaften natürlichen Schwankungen unterworfen sind. Zum anderen wirken sich die festigkeits- und steifigkeitsrelevanten Merkmale wie zum Beispiel Äste oder die Faserneigung durch die vielfältigen Einschnittmöglichkeiten bei der Herstellung mehr oder weniger auf das einzelne Stück Schnittholz aus.

Der Einsatz von Schnittholz als Bauholz für tragende Zwecke erfordert deshalb eine geeignete Sortierung in verschiedene Festigkeitsklassen, die innerhalb einer Klasse vor allem charakteristische Festigkeitswerte gewährleistet. Auf europäischer Ebene sind diese Festigkeitsklassen in DIN EN 338 (1996) geregelt. Ausgehend von der charakteristischen Festigkeit kann dann der Bauteilwiderstand bei der Bemessung von Tragwerken bestimmt werden. Eine umfassende Darstellung der Hintergründe zur Festigkeitssortierung und den Festigkeitsklassen von Vollholz finden sich zum Beispiel bei Glos (1995).

Schnittholz wird entweder visuell oder maschinell sortiert. Eine visuelle Sortierung ist ein einfaches Verfahren zur Sortierung von Schnittholz. Unter Einsatz von Personal wird das Holz begutachtet. Bei sorgfältiger

Durchführung kann auch Schnittholz von überdurchschnittlicher Tragfähigkeit zuverlässig sortiert werden. Da allerdings die Rohdichte visuell nicht exakt erfasst werden kann, diese aber einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit besitzt, bleibt die Ausbeute in der höchsten Sortierklasse S13 der DIN 4074 (2003), das entspricht der Festigkeitsklasse C30 nach EN 338, gering. Eine Sortierung von Schnittholz mit höherer Tragfähigkeit ist visuell nicht möglich. Mit der Entwicklung von Sortiermaschinen, die neben Rohdichte und Elastizitätsmodul vor allem die Äste mittels Durchstrahlung oder Bildverarbeitung erkennen, wurden der Holzverarbeitenden Industrie Hilfsmittel zur effizienten Nutzung von Schnittholz mit besonders hoher Tragfähigkeit bereitgestellt. Diese Maschinen ermöglichen die Sortierung von Schnittholz zur Zeit bis zur Festigkeitsklasse C40. Einen Überblick darüber geben Blaß und Görlacher (1996). Aufgrund der hohen Investitionskosten sind derartige Maschinen nicht für alle Unternehmen der Holzindustrie wirtschaftlich. Die hohen Anschaffungskosten werden hauptsächlich durch die Maschinenkomponenten verursacht, die der Durchstrahlung oder Bildverarbeitung dienen.

Die Konkurrenzfähigkeit von Holz gegenüber anderen Baustoffen ließe sich weiter steigern, wenn Unternehmen, die ihre Sortierung bislang visuell nach DIN 4074-1 durchgeführt haben, ihre Angebotspalette um Hölzer der Festigkeitsklasse C35 erweitern könnten. Denkbar wäre das, indem die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 durch einen maschinell zu ermittelnden Parameter ergänzt würde. Eine Maschine, die diesen Parameter ermittelt, müsste nicht über eine kostspielige Maschinenkomponente verfügen, die visuelle festigkeitsmindernde Merkmale erkennt.

2 Untersuchungsmaterial und Vorgehensweise

2.1 Allgemeines

Repräsentativ entnommenes Nadel-Schnittholz wurde visuell nach DIN 4074-1 sortiert. Es deckt den Anwendungsbereich der Brettschichtholz- und Nagelplattenbinder-Herstellung ab. Die maschinell messbaren Eigenschaften Maße, Bruttorohichte und dynamischer E-Modul wurden erfasst. Der dynamische E-Modul wurde an jedem Stück Schnittholz unmittelbar nach dem Einschnitt und nach der technischen Trocknung ermittelt. Anschließend wurde an einer Hälfte jeder Stichprobe die

Biege- und an der anderen die Zugfestigkeit nach EN 408 (1996) bestimmt.

2.2 Untersuchungsmaterial

Das Untersuchungsmaterial wurde während zwei um ein Jahr voneinander getrennten Zeitspannen in vier in Deutschland ansässigen Sägewerken zu etwa gleichen Teilen in Form von 18 Stichproben entnommen (Tabelle 1). Bei den Stichproben mit einer Breite zwischen 50 mm und 80 mm handelt es sich um Kanthölzer, bei den restlichen um Brettlamellen beziehungsweise Bohlen. Die Länge der Schnitthölzer betrug 3,80 m bis 5,20 m. Die Belegung der Zellen in Tabelle 1 legt Querschnittsmaße fest, für welche die folgenden Forschungsergebnisse gültig sind. Diese Ergebnisse sind nicht ohne Weiteres auf Querschnittsmaße außerhalb der diagonal verlaufenden Belegung übertragbar. In Hinblick auf den Einfluss der Querschnittsmaße auf die Festigkeit wurde das Höhen- und Breitenspektrum gestaffelt. Bei zwei Stichproben beträgt der Umfang aufgrund von Lieferbedingungen 88 beziehungsweise 89 Stück. Die Untersuchung und Festigkeitsprüfung des Schnittholzes wurde an sägerauem Holz durchgeführt. Insgesamt wurden 610 Brettlamellen beziehungsweise Bohlen und 478 Kanthölzer untersucht sowie ausgewertet.

2.3 Vorgehensweise

In Hinblick auf eine sinnvolle Abstimmung mit der maschinellen Festigkeitssortierung stellt sich die Frage nach den Mindestanforderungen an die visuelle Sortierung, die im Zusammenhang mit einer maschinellen Festigkeitssortierung erbracht werden muss. Um diese Frage zu klären, wurde das gesamte Schnittholz nach DIN 4074-1 im Labor visuell sortiert. Berücksichtigung fanden dabei alle festigkeitsrelevanten Sortierkriterien. Zu diesen zählen der Einzelast, die Astansammlung, wahlweise der Schmalseitenast, die Markröhre, die Faserneigung, unzulässige Risse und sonstige Merkmale. Diese umfassen mechanische Schäden, Rindeneinschluss, überwallte Stammverletzungen und Wipfelbruch. Fälle, in denen die Jahringbreite oder Baumkante für die Sortierung maßgebend wurde, festigkeitsmindernde Fäule und Fraßgänge sowie Druckholz konnten beim untersuchten Schnittholz nicht festgestellt werden.

Tabelle 1 Querschnittsmaße [mm] und Umfang der 18 Stichproben

Table 1 Cross-sectional dimensions [mm] and sample size

	Breite		Dicke/Höhe			
	20	36	48	100	180	240
50	–	–	–	53+60	–	52
60	–	–	–	–	53+88	–
80	–	–	–	–	57	53+62
100	60+89	–	57	–	–	–
175	–	50+60+56	60	–	–	–
220	64	–	53+61	–	–	–

Von besonderer Bedeutung für eine visuelle Sortierung, die sich als Ergänzung zur maschinellen Festigkeitssortierung versteht, sind vor allem lokale festigkeitsmindernde Merkmale. Diese werden durch den dynamischen E-Modul—ein Mittelwert über die gesamte Brettlänge—entweder nicht oder im Falle von Ästen nur bedingt „erkannt“. So schlägt sich ein einziger großer Ast im Brett, der ausschlaggebend für die Festigkeit ist, im Zahlenwert des dynamischen E-Moduls unwesentlich nieder. Im Gegenteil dazu werden Bretter, die wachstumsbedingt in kleinen regelmäßigen Abständen einen großen Astquirl besitzen, einen geringen dynamischen E-Modul aufweisen. Dieser hat dann einen zahlenmäßig kleinen maschinellen Sortierparameter zur Folge. Diese Zusammenhänge wurden von Görlacher (1990) systematisch untersucht.

Es wurde angenommen, dass es sich bei derjenigen Stelle, welche für die visuelle Sortierung maßgebend ist, auch um den schwächsten Querschnitt für die Festigkeitsprüfung nach EN 408 handelte. Da die visuell bestimmte schwächste Stelle, im Folgenden als X1 bezeichnet, nicht immer innerhalb der Lastangriffspunkte (Biegeprüfung) bzw. innerhalb der freien Prüflänge (Zugprüfung) lag, sondern auch am Ende des Schnittholzes, müssen zwei Fälle unterschieden werden. 1.: Der übrige Bereich war weitgehend frei von gleichwertigen Schwachstellen, dann wurde die Schwachstelle X1 in Hinblick auf ein Abtrennen oder Kürzen des Schnittholzes in der Praxis ignoriert. Diese Vorgehensweise galt insbesondere für das Sortierkriterium „sonstige Merkmale“. 2.: Der übrige Bereich wies weitgehend gleichwertige Schwachstellen X2, X3 ... auf, dann wurde die Stelle X1 für die Sortierung zu Grunde gelegt und die Festigkeitsprüfung an einer prüfbareren Stelle X2 oder X3... durchgeführt. Dieses Vorgehen galt insbesondere für das Sortierkriterium „Äste“. Die Vorgehensweise in den Fällen 1 und 2 unterstützt die Festigkeitsvorhersage auf der Grundlage der visuellen Sortierung. Sie wird dem oben beschriebenen Einfluss von Ästen als lokale Schwachstellen bestmöglich gerecht.

Es wurden folgende maschinell messbare Eigenschaften ermittelt: 1. Dicke oder Höhe des Schnittholzes, 2. Breite des Schnittholzes, 3. Bruttorohichte von trockenem Holz und damit 4. der dynamische Elastizitätsmodul von trockenem Holz, 5. Bruttorohichte von frischem Holz und damit 6. der dynamische Elastizitätsmodul von frischem Holz. Die Werte dieser Eigenschaften wurden unter Laborbedingungen beziehungsweise im Sägewerk ermittelt. Hilfsmittel waren Messschieber, elektronische Waage und das Messgerät GRINDO-SONIC zur Schwingungszeitmessung. Zur grundsätzlichen Eignung der Schwingungszeitmessung für die maschinelle Schnittholzsortierung wird auf Görlacher (1990) verwiesen.

Bei der Auswertung der Sortierergebnisse war beachtet, die Zuverlässigkeit der kombinierten visuellen und maschinellen Festigkeitssortierung nicht nur mit 5%-Fraktilwerten der Biege-, sondern auch mit 5%-Fraktilwerten der Zugfestigkeit zu beurteilen. Deshalb wurden bei 17 Stichproben jeweils zur Hälfte Biege- und Zug-

versuche durchgeführt. Nur bei einer Stichprobe wurde ausschließlich die Biegefestigkeit bestimmt. Die Biegefestigkeit wurde bei den Brettlamellen und Bohlen in einem Flachkant- und bei den Kanthölzern in einem Hochkant-Biegeversuch ermittelt. Die Biegeversuche wurden nach EN 408 durchgeführt. Abweichend von EN 408 wurde jedoch der Biege-Elastizitätsmodul der Prüfkörper von Brettlamellen der zweiten Entnahme mittels einer Biegeschwingung erster Ordnung nach Görlacher (1984) bestimmt. Die Werte des Biege-Elastizitätsmoduls der statischen Versuche an den Prüfkörpern erwiesen sich aufgrund der Wechselwirkung zwischen Querkrümmung der sägerauen Prüfkörper und der Messeinrichtung als unzuverlässig. Das Institut für Holzforschung München, das über eine den Querschnitten entsprechend leistungsfähige Zug-Prüfmaschine verfügt, führte die Zugversuche nach EN 408 durch.

3 Visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung

3.1 Zusammenhang zwischen visueller Sortierung und Festigkeit

Das Sortierergebnis einer ordnungsgemäßen visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 ist in Abb. 1 für Brettlamellen und Bohlen—mit und ohne Berücksichtigung von Schmalseitenästen—und für Kanthölzer dargestellt. Schmalseitenäste sind bei einer Sortierung von Brettern und Bohlen zu berücksichtigen, die nicht ausschließlich für die Brettschichtholzherstellung vorgesehen sind.

Die Abb. 2 und 3 verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Biege- sowie Zugfestigkeit und dem Kriterium Astansammlung im Falle von Brettlamellen und dem Kriterium Einzelast im Falle von Kanthölzern. Symbole des Ausschusses oder einer niedrigeren Sortierklasse im zulässigen Ästigkeitsbereich einer höheren Sortierklasse zeigen an, dass ein weiteres Kriterium für die Sortierung maßgebend wurde. Beispielsweise ist das Auftreten von S10-Symbolen im Bereich der S13-Symbole hauptsächlich durch das Vorhandensein der Marktröhre oder in seltenen Fällen durch einen Einzelast, der den entsprechenden Grenzwert überschreitet, begründet.

3.2 Zusammenhang zwischen maschinell messbaren Parametern und Festigkeit

Abbildung 4 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen den dynamischen E-Moduln, ermittelt an frischem und trockenem Holz. Die Holzfeuchte im Schnittholz betrug unmittelbar nach dem Einschnitt über 30%. Nach der technischen Trocknung betrug sie bei den Prüfkörpern der Brettlamellen im Mittel 10% und bei den Kanthölzern im Mittel 12,3%.

Die gute Korrelation ($r=0,98$) zwischen den beiden E-Moduln ist Voraussetzung für eine Sortierung unmittelbar nach dem Einschnitt, mit dem Ziel nachfolgende Produktionschritte von aussortierten Schnitthölzern zu ent-

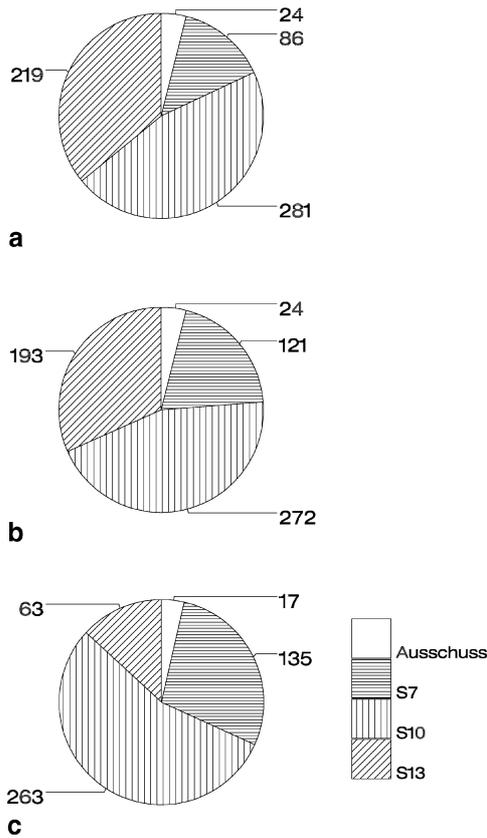


Abb. 1a–c Sortierergebnisse der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1. Brettlamellen für **a** BSH, Brettlamellen unter **b** Berücksichtigung von Schmalseitenästen und **c** Kanthölzer
Fig. 1a–c Grading results according to DIN 4074-1. Lamellae for **a** glued laminated timber, lamellae also considering **b** knots appearing on the narrow side and **c** joists

lasten. Glos und Burger (1998) haben mit der gleichen Zielsetzung den erfolgreichen Einsatz einer Biege-/Durchstrahlungsmaschine unmittelbar nach dem Einschnitt bereits nachgewiesen. In Abb. 5 sind sowohl die Biege- als auch Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom dynamischen E-Modul und von der Bruttorohichte vergleichend gegenübergestellt. Die erwartungsgemäß bessere Vorhersage

der Festigkeit durch den dynamischen E-Modul verdeutlichen die 95%-Vertrauensgrenzen für Einzelwerte, die jeweils parallel zu den Regressionsgeraden in den Diagrammen eingezeichnet sind. Demnach liegen 95% der Werte für die Biegefestigkeit (für die Zugfestigkeit) bei gegebenem dynamischen E-Modul in einem Bereich von etwa 40 N/mm² (34 N/mm²) und bei gegebener Bruttorohichte in einem Bereich von 51 N/mm² (43 N/mm²).

4 Kombination von maschineller und visueller Festigkeitssortierung

4.1 Herleitung von Regressionsgleichungen für den maschinellen Sortierparameter

Der maschinelle Sortierparameter wurde anhand der Ergebnisse der Biegeversuche bestimmt. Er ist ein Vorhersagewert der scheinbar kleinsten Biegefestigkeit von jedem Stück Schnittholz. Mittels multipler linearer Regression wurden Regressionsgleichungen bestimmt, nach denen der Wert des maschinellen Sortierparameters berechnet werden kann. Es wurden dabei ausschließlich Eigenschaften der Schnitthölzer der Sortierklassen S10 und S13 berücksichtigt. In Tabelle 2 sind drei für praktische Anwendungen relevante Regressionsgleichungen zusammengestellt. Weitere finden sich bei Blaß und Frese (2002). Sie unterscheiden sich durch verschiedene Kombinationen von unabhängigen Parametern, die als Information über jedes Stück Schnittholz bekannt sein müssen. In Gl. 1 sind dies die Querschnittsmaße und die Bruttorohichte, in Gl. 2 zusätzlich der dynamische E-Modul von trockenem Schnittholz und in Gl. 3 die Querschnittsmaße und der dynamische E-Modul von frischem Schnittholz. Für jede dieser drei Gleichungen erfolgten Sortierungen in die Festigkeitsklasse C35 mittels eines Vergleichs des Zahlenwertes des maschinellen Sortierparameters mit einem Grenzwert. Dessen Festlegung erfolgte durch Anheben in kleinen Schritten, bis ein „stabiles“ Sortierergebnis erreicht wurde, das die Klassifizierung in die Festigkeitsklasse C35 erlaubt. Die Gleichungen und deren Grenzwerte wurden abschließend durch eine Sor-

Abb. 2 a Biegefestigkeit und **b** Zugfestigkeit von Brettlamellen in Abhängigkeit von der Ästigkeit—Astansammlung
Fig. 2 a Bending strength and **b** tensile strength of lamellae depending on the knot ratio—knot cluster

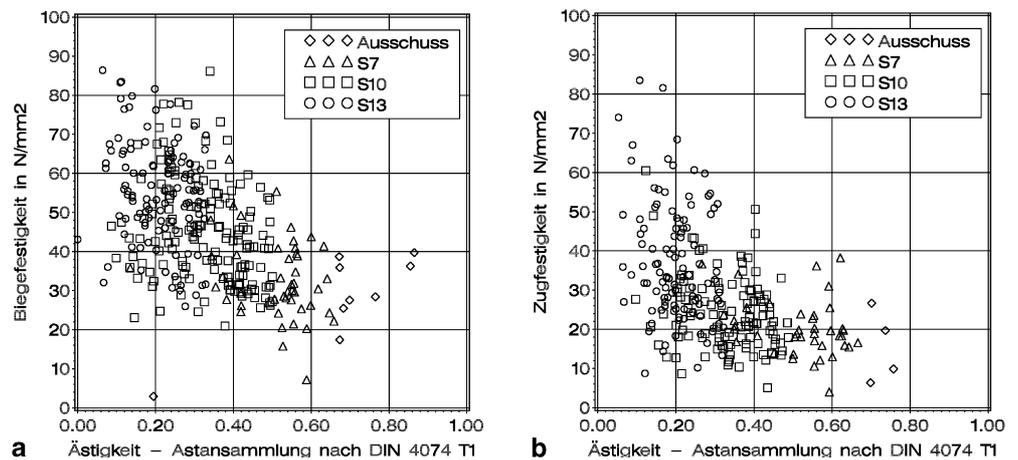


Abb. 3 a Biegefestigkeit und **b** Zugfestigkeit von Kanthölzern in Abhängigkeit von der Ästigkeit—Einzelast

Fig. 3 a Bending strength and **b** tensile strength of joists depending on the knot ratio—single knot

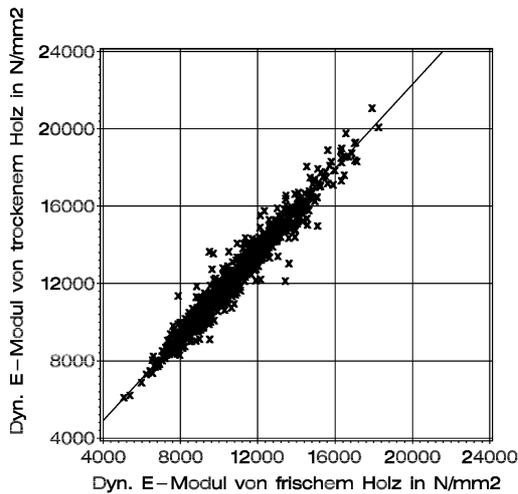
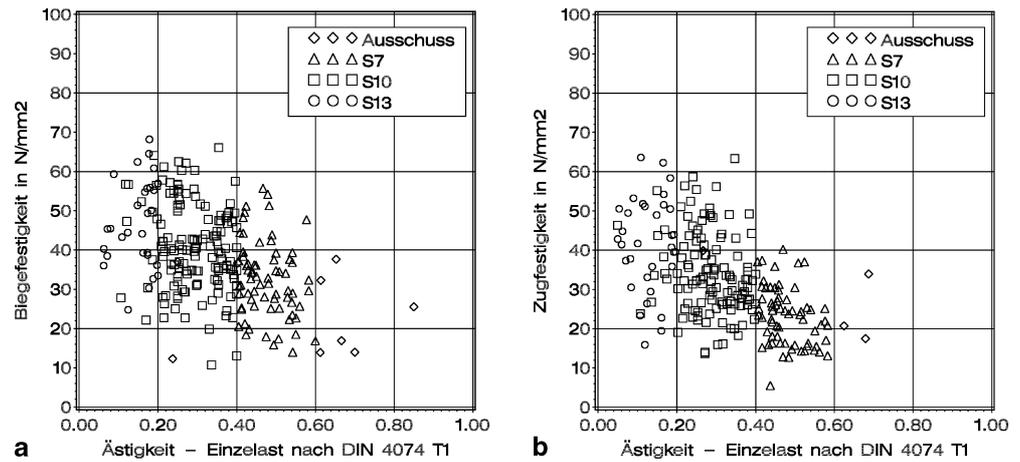


Abb. 4 Abhängigkeit zwischen dynamischem E-Modul von trockenem und frischem Schnittholz

Fig. 4 Dynamic MOE of dry sawn timber depending on dynamic MOE of green sawn timber

rierung der im Zugversuch geprüften Schnitthölzer überprüft. Kriterium war nun ersatzweise das Erreichen der charakteristischen Zugfestigkeit, 21 N/mm^2 von C35. Auf den Abb. 6, 7 und 8 sind die Biege- sowie Zugfestigkeit über dem maschinellen Sortierparameter dargestellt.

Die zugehörigen Grenzwerte für den maschinellen Sortierparameter der Gl. 1 bis 3 sowie die charakteristischen Festigkeitswerte von C35 sind in die Diagramme eingetragen. Die Abb. 6, 7 und 8 sollen zweierlei deutlich machen. Zum einen klärt sich die Frage nach den Mindestanforderungen an die visuelle Sortierung, zum anderen wird begründet, warum Schnitthölzer der Sortierklassen S10 und S13 für die Herleitung der Regressionsgleichungen herangezogen wurden. In Abb. 6 wird deutlich, dass sich der festigkeitsmindernde Einfluss von Ästen vor allem bei Brettlamellen im Wert des Sortierparameters nach Gl. 1 erwartungsgemäß nicht niederschlägt. Im gesamten Wertebereich des Sortierparameters—etwa 30 N/mm^2 bis 80 N/mm^2 —finden sich Beobachtungen der Sortierklasse S7 und des Ausschusses

mit niedrigen Festigkeitswerten. Im Gegensatz dazu liegen die Werte des maschinellen Sortierparameters der Schnitthölzer der Sortierklasse S7 und des Ausschusses in den Abb. 7 und 8 hauptsächlich links von den eingezeichneten Sortiergrenzen. Dies ist ein Merkmal dafür, dass Äste, wenn sie im Schnittholz gehäuft auftreten, von entscheidendem Einfluss auf den dynamischen E-Modul und den Sortierparameter nach Gl. 2 oder 3 sind. Die Abb. 2 und 3a zeigen, dass Schnittholz der Sortierklasse S7 und des Ausschusses hauptsächlich eine Biegefestigkeit unter 35 N/mm^2 beziehungsweise eine Zugfestigkeit unter 21 N/mm^2 aufweist. Naheliegender ist daher, die visuelle Sortierung in Kombination mit einer maschinellen Sortierung auf die Sortierung von S10 und besser einzuschränken.

Die Abb. 6, 7 und 8 zeigen, dass sich Schnitthölzer des Ausschusses und der Sortierklasse S7 nicht in den linearen Zusammenhang im unteren Bereich der Beobachtungen S10 und S13 einfügen. Die Wertepaare (Biegefestigkeit/maschineller Sortierparameter) liegen vorwiegend unterhalb der eingezeichneten Regressionsgeraden für S10 und S13. Deshalb wurden die Schnitthölzer des Ausschusses und der Sortierklasse S7 bei der Herleitung der Regressionsbeziehungen nicht berücksichtigt.

4.2 Diskussion der Regressionsgleichungen und der Sortierergebnisse

Eine Sortierung nach Gl. 1 ermöglicht ein maschinell einfaches Verfahren. Werden die Mindestanforderungen an die visuelle Sortierung eingehalten und für jede Brettlamelle lediglich die Brutorohdichte bestimmt, so kann mit einem Grenzwert von 52 N/mm^2 für den maschinellen Sortierparameter Ausgangsmaterial für BS 16 sortiert werden. Aufgrund der mäßigen Korrelation ($r=0,49$) zwischen Biegefestigkeit und Brutorohdichte bei Kanthölzern der Sortierklassen S10 und S13 ist dieses Verfahren für die Sortierung von Kanthölzern ungeeignet. Der fehlende Einfluss von Ästen auf den Sortierparameter nach Gl. 1 lässt der visuellen Sortierung innerhalb dieser Kombination besondere Bedeutung zukommen.

Abb. 5a–d Biegefestigkeit (a und b) und Zugfestigkeit (c und d) jeweils in Abhängigkeit vom dynamischen E-Modul und der Bruttoreohdichte

Fig. 5a–d Bending strength (a and b) and tensile strength (c and d) depending on dynamic MOE of dry sawn timber and apparent density

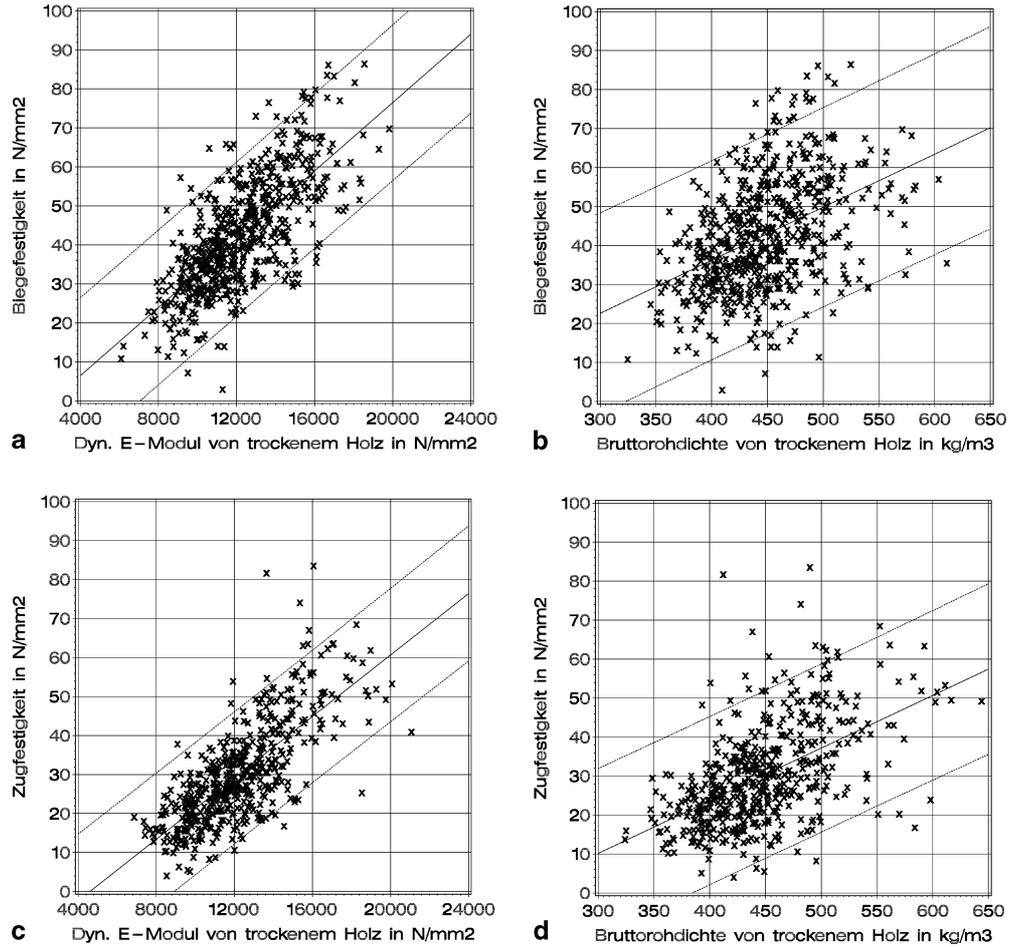


Tabelle 2 Regressionsgleichungen für den maschinellen Sortierparameter
Table 2 Regression equations

Gleichung	[N/mm ²]	Konstanten bzw. Koeffizienten der Regressionsgleichungen					r	
		Konstante	Breite	Dicke/Höhe	Bruttoreohdichte (trockenes Holz)	Dyn. E-Modul (trockenes Holz)		Dyn. E-Modul (frisches Holz)
1	<i>fm,p</i> =	-44,8	-0,01710	+0,1160	+0,2080		0,592	
2	<i>fm,p</i> =	+13,4	-0,01320	-0,0449	-0,0414	+0,00454	0,729	
3	<i>fm,p</i> =	+4,98	-0,00474	-0,0492			+0,00422 0,713	

fm,p: Zahlenwert des maschinellen Sortierparameters

r: multipler Korrelationskoeffizient

Den Gl. 1 bis 3 liegen die Eigenschaften der Schnitthölzer S10 und S13 zugrunde

Wird zusätzlich der dynamische E-Modul von trockenem Holz berücksichtigt, wie in Gl. 2, so kann mit einem größeren maschinellen Einsatz eine höhere Ausbeute erreicht werden. Darüber hinaus ist bei diesem Verfahren eine Sortierung von Brettlamellen und Kant-hölzern gleichzeitig möglich. Diese Kombination ist robuster im Hinblick auf Ungenauigkeiten in der visuellen Sortierung, weil sich der Einfluss von festigkeitsmindernden Ästen auf den Sortierparameter nach Gl. 2 spürbar auswirkt.

Der lineare Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul von trockenem und frischem Schnittholz lässt die

Abb. 7 und 8 kongruent erscheinen und erklärt die identischen Grenzwerte für den maschinellen Sortierparameter. In Abb. 7a sind lediglich 60 Werte einer Stichprobe zusätzlich dargestellt, für die der dynamische E-Modul von frischem Holz nicht ermittelt wurde.

Die Zuordnung von Nadel-schnittholz in die Festigkeitsklasse C35 nach EN 338 erfordert auch einen mittleren E-Modul von 13.000 N/mm². Weil der Biege-E-Modul für Brettlamellen aus den in Abschnitt 2.3 genannten Gründen nicht nach EN 408 bestimmt wurde, wird als weiteres Kriterium für die Klassifizierung der dynamische E-Modul verwendet. Dies dient der besseren

Abb. 6 a Biegefestigkeit und **b** Zugfestigkeit jeweils in Abhängigkeit vom maschinellen Sortierparameter nach Gl. 1
Fig. 6 a Bending strength and **b** tensile strength depending on grading parameter according to Eq. 1

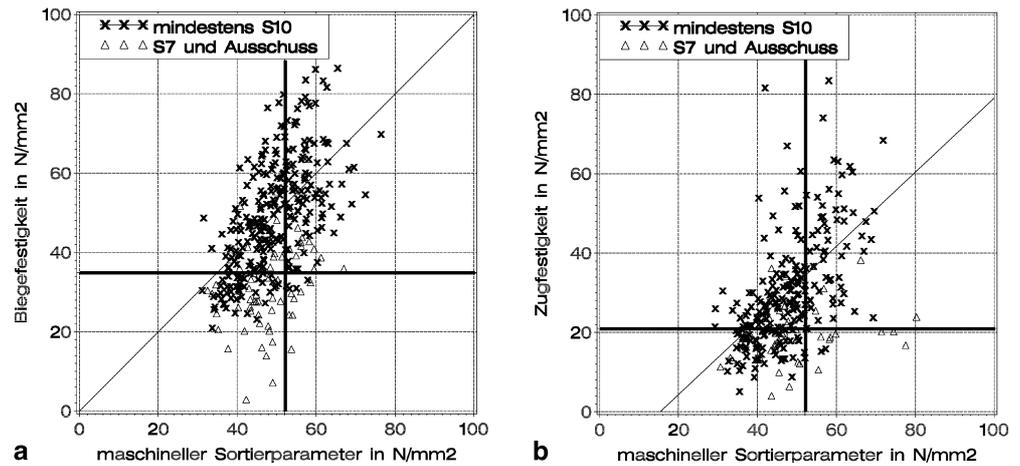


Abb. 7 a Biegefestigkeit und **b** Zugfestigkeit jeweils in Abhängigkeit vom maschinellen Sortierparameter nach Gl. 2
Fig. 7 a Bending strength and **b** tensile strength depending on grading parameter according to Eq. 2

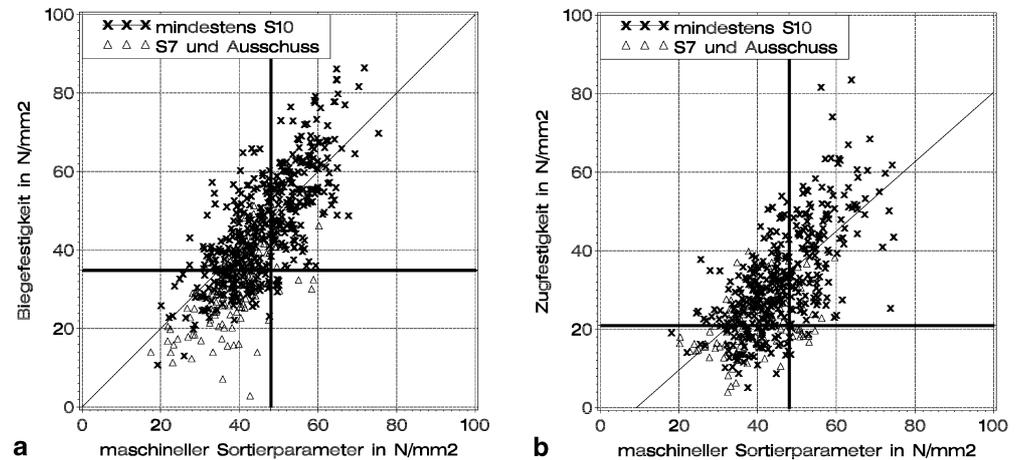
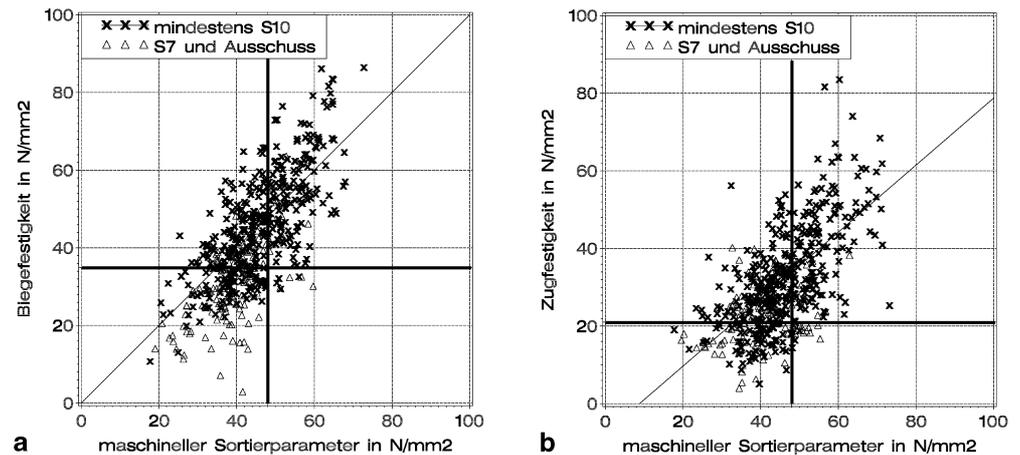


Abb. 8 a Biegefestigkeit und **b** Zugfestigkeit jeweils in Abhängigkeit vom maschinellen Sortierparameter nach Gl. 3
Fig. 8 a Bending strength and **b** tensile strength depending on grading parameter according to Eq. 3



Vergleichbarkeit für alle Schnitthölzer. Abbildung 9 zeigt die Beziehung zwischen dem statischen E-Modul aus einem Zugversuch und dem dynamischen E-Modul. Bei Brettlamellen und Kanthölzern der Sortierklassen S10 und S13, die für eine Klassifizierung in C35 in Frage kommen, liegt oberhalb von 10.000 N/mm² der Mittelwert des statischen E-Moduls etwa zwischen 90% und 100% des dynamischen E-Moduls. Demnach sollte der

charakteristische Wert des dynamischen E-Moduls bei einer Sortierung in die Klasse C35 mindestens 14.300 N/mm² erreichen.

In Tabelle 3 sind Anhaltswerte für die Sortiergrenzen, die zugehörigen charakteristischen Festigkeitswerte sowie die Ausbeuten zusammengestellt. Es wird in allen Fällen von den in die Klasse C35 sortierten Hölzern ein mittlerer dynamischer E-Modul von mindestens 14.300 N/mm²

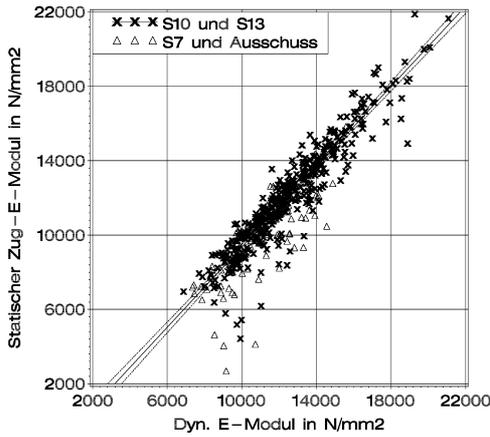


Abb. 9 E-Modul von Brettlamellen und Kanthölzern aus einem statischen Zugversuch nach EN 408 in Abhängigkeit vom dynamischen E-Modul ermittelt aus Längsschwingungen. Regressionsgerade und 95%-Vertrauensgrenzen für Mittelwerte von S10 und S13

Fig. 9 MOE of lamellae and joists determined in a static tension test according to EN 408 in relation to the dynamic MOE. Regression line and 95%-confidence intervals for mean values of S10 and S13

und eine charakteristische Rohdichte ($u=12\%$) nach EN 408 von 400 kg/m^3 erreicht.

4.3 Einfluss von Schmalseitenästen

Werden die Mindestanforderungen an die visuelle Sortierung um das Kriterium Schmalseitenast erweitert, folgt daraus eine Umverteilung von S13 und S10 nach S7. In Tabelle 4 ist das entsprechende Sortierergebnis am Beispiel einer Sortierung für Brettlamellen nach Gl. 2 dargestellt.

Die Verschärfung der visuellen Sortierung durch die Berücksichtigung von Schmalseitenästen macht sich ins-

besondere in einem Rückgang der Ausbeute der Biegeprüfkörper bemerkbar. Da sich allerdings die Fraktilwerte nicht verbessern, was bei einer strengeren visuellen Sortierung zu erwarten wäre, kann mit den untersuchten Brettern und Bohlen keine eindeutige Trendänderung im Sortierergebnis gezeigt werden. Es kann allerdings belegt werden, dass Gl. 2 auch geeignet ist, Bretter und Bohlen, die nicht ausschließlich für die BSH-Herstellung bestimmt sind, in die Festigkeitsklasse C35 einzustufen.

4.4 Unschärfe der Festigkeitssortierung

Sowohl die maschinelle als auch die visuelle Festigkeitssortierung sind in gewissen Grenzen einer Unschärfe unterworfen. Diese macht sich bei der maschinellen Festigkeitssortierung unter anderem in Form von Schwankungen bemerkbar, denen der Zahlenwert des maschinellen Sortierparameters bei mehrmaliger Wiederholung des Sortiervorgangs unterworfen ist. Die Zahlenwerte dürfen laut DIN 4074-3 nicht mehr als 5% voneinander abweichen. Ihr Einfluss auf das Sortierergebnis ist damit unbedeutend. Naheliegender ist aber eine vergleichsweise große Unschärfe im Bereich der visuellen Sortierung unter praktischen Bedingungen. Von Interesse ist also die mögliche Veränderung des Sortierergebnisses—charakteristische Festigkeitswerte und Ausbeute—wenn die visuelle Sortierung unter praktischen Bedingungen, wie z. B. hohem Holzdurchsatz und subjektiver Einschätzung der festigkeitsrelevanten Sortierkriterien durch die Sortierer, durchgeführt wird. In diesem Zusammenhang kann sich eine ungenaue visuelle Sortierung in zwei Richtungen auswirken.

1. Es werden Schnitthölzer der Sortierklassen S10 und S13 entgegen den Sortierregeln in die Sortierklasse S7 eingestuft oder dem Ausschuss zugeordnet und gehen somit für das Sortierergebnis unwiederbringlich ver-

Tabelle 3 Charakteristische Biege- und Zugfestigkeit sowie Ausbeute bei einer kombinierten maschinellen und visuellen Festigkeitssortierung

Table 3 Characteristic bending and tensile strength and yield based on combined visual and machine strength grading

Gleichung	Kollektiv	Grenzwert [N/mm ²]	Ausbeute in C35	$f_{m,k}$ [N/mm ²]	Werte	$f_{t,k}$ [N/mm ²]	Werte
Gl. 1	Brettlamellen	52	27%	35,9	102	21,4	64
Gl. 2	Brettlamellen	48	41%	38,4	147	21,1	104
	Kanthölzer		18%	31,3	44	35,4	41
Gl. 3	Brettl.+Kanth.	48	31%	36,1	191	22,5	145
	Brettlamellen		40%	39,0	109	20,6	110
	Kanthölzer		18%	31,4	45	29,6	43
	Brettl.+Kanth.		30%	36,3	154	21,4	153

Tabelle 4 Charakteristische Biege- und Zugfestigkeit sowie Ausbeute bei einer kombinierten maschinellen und visuellen Festigkeitssortierung. Zusätzliche Berücksichtigung von Schmalseitenästen

Table 4 Characteristic bending and tensile strength and yield based on combined visual and machine strength grading. Knots appearing on the narrow side additionally taken into account

Gleichung	Kollektiv	Grenzwert [N/mm ²]	Ausbeute in C35	$f_{m,k}$ [N/mm ²]	Werte	$f_{t,k}$ [N/mm ²]	Werte
Gl. 2	Brettlamellen	48	39%	37,3	137	21,4	101

Tabelle 5 Charakteristische Biege- und Zugfestigkeit sowie Ausbeute bei völligem Verzicht auf die visuelle Sortierung innerhalb des kombinierten Verfahrens

Gleichung	Kollektiv	Grenzwert	Ausbeute	$f_{m,k}$	Werte	$f_{t,k}$	Werte
		[N/mm ²]		[N/mm ²]		[N/mm ²]	
Gl. 1	Brettlamellen	52	33%	30,2	124	16,6	77
Gl. 2	Brettl.+Kanth.	48	34%	33,9	209	18,8	163

Table 5 Characteristic bending and tensile strength and yield based on machine strength grading parameters and disregarding the visual grading parameters

loren. Die Zahlenwerte des Sortierparameters dieser Schnitthölzer übersteigen den erforderlichen Grenzwert der maschinellen Festigkeitssortierung und gleichzeitig liegt die Biege- oder Zugfestigkeit oberhalb der erforderlichen 5%-Fraktile für C35. Diese Schnitthölzer würden sich im Sortierergebnis positiv auswirken, weil sie die charakteristische Festigkeit anheben.

- Es werden Schnitthölzer der Sortierklasse S7 und des Ausschusses entgegen den Sortierregeln in die Sortierklassen S10 oder S13 eingestuft. Diese weisen Biege- bzw. Zugfestigkeiten unterhalb der für C35 erforderlichen 5%-Fraktile auf. Die Zahlenwerte des Sortierparameters liegen über dem erforderlichen Grenzwert. Diese Schnitthölzer würden folglich im Sortierergebnis verbleiben und sich darauf negativ auswirken, weil sie die charakteristische Festigkeit senken.

Am Beispiel der Sortiererergebnisse für Gl. 1 und 2 ist in Tabelle 5 die Auswirkung auf das Sortierergebnis bei völligem Verzicht auf die visuelle Sortierung anhand der 5%-Fraktile und der Ausbeute zu sehen. Der Einfluss einer Ungenauigkeit wie in Punkt 1 beschrieben würde das Ergebnis noch weiter verschlechtern. Aus der Gegenüberstellung der 5%-Fraktile geht hervor, dass der Verzicht auf die visuelle Sortierung zu einem spürbaren Abfall der charakteristischen Festigkeitswerte beim Kollektiv Brettlamellen (Gl. 1) und den Gesamtkollektiven (Gl. 2) führt. Trotzdem zeigt sich die Überlegenheit der maschinellen Sortierung innerhalb eines kombinierten Verfahrens, deren entscheidende Wirkung—vor allem bei Gl. 2—auf das Sortierergebnis keinesfalls verloren geht.

Für den Anwender eines kombinierten Sortierverfahrens wird von Interesse sein, inwieweit seine individuellen betrieblichen Voraussetzungen (z. B. eingesetztes Personal für die visuelle Sortierung und Maschinenbedienung, Einschnitt, Sägewerkstechnologie oder Rundholzlieferungen aus bestimmten Wuchsgebieten) das Sortierergebnis beeinflussen. Bei der Entwicklung des kombinierten Sortierverfahrens wurden individuelle betriebliche Bedingungen durch eine repräsentative Entnahme des Untersuchungsmaterials nur anteilig erfasst und die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 exakt und weitgehend objektiv im Labor durchgeführt. Daher sei angemerkt, dass vor Anwendung des kombinierten Sortierverfahrens in einem bestimmten Betrieb nach DIN 4074-4 eine Anfangsprüfung mit 40 Biegeversuchen am klassifizierten Schnittholz durchzuführen ist. Darüber hinaus dienen jährliche Prüfungen nach DIN 4074-4 dem Nach-

weis, dass die erforderlichen Voraussetzungen für die Anwendung des kombinierten Sortierverfahrens erfüllt sind.

5 Zusammenfassung

Es konnte die prinzipielle Eignung von drei unterschiedlichen kombinierten Sortierverfahren für die Klassifizierung von Schnittholz in die Festigkeitsklasse C35 belegt werden. Diese Verfahren sind Kombinationen aus einer maschinellen Festigkeitssortierung und einer vereinfachten visuellen Sortierung in Anlehnung an DIN 4074-1. Zur maschinellen Festigkeitssortierung wird entweder der dynamische E-Modul von frischem oder trockenem Holz, ermittelt aus einer Längsschwingung oder die Brutorohdichte (Masse geteilt durch Volumen des Schnittholzes bei etwa 12% Holzfeuchte) verwendet. Zur Sortierung wird der maschinelle Sortierparameter mit einem Grenzwert verglichen. Die visuelle Sortierung sieht vor, dass Schnitthölzer die Grenzwerte von S10 erfüllen müssen. Dabei müssen mindestens Äste und Faserneigung zusätzlich zu den Kriterien der Tabelle 5, DIN 4074-1 beim Sortiervorgang berücksichtigt werden.

Kombinierte Verfahren, die auf dem dynamischen E-Modul beruhen, eignen sich für die gemeinsame Festigkeitssortierung von Brettlamellen und Kanthölzern in die Festigkeitsklasse C35. Wird der dynamische E-Modul an frischem Holz ermittelt, kann eine Sortierung unmittelbar nach dem Einschnitt erfolgen. Dabei müssen keine Einbußen bezüglich der Ausbeute in Kauf genommen werden. Das Verfahren, dessen maschinelle Sortierung auf der Ermittlung der Brutorohdichte beruht, ist insbesondere für die Sortierung von Brettlamellen zur Herstellung von BS 16 geeignet.

Diese Ergebnisse belegen die Kombination von der visuellen Sortierung nach DIN 4074, einem Verfahren mit langer Tradition und hohem Bekanntheitsgrad, und maschineller Festigkeitssortierung. Die nach DIN 4074-4 vorgeschriebene Anfangsprüfung bei Einführung des kombinierten Verfahrens in einem Betrieb sowie jährliche Überprüfungen werden die Anwendbarkeit des kombinierten Sortierverfahrens unter praktischen und individuellen Betriebsbedingungen in Zukunft unter Beweis stellen.

Literatur

- Blaß HJ, Frese, M (2002) Entwicklung eines Sortierverfahrens für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau. Karlsruhe, Universität (TH)
- Blaß HJ, Görlacher R (1996) Visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung von Vollholz. *Mikado* 5/96:64–71
- DIN 4074 (2003) Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit, Teil 1 und 4, Ausgabe Juni
- DIN EN 408 (1996) Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz—Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften, Ausgabe April
- DIN EN 338 (1996) Bauholz für tragende Zwecke—Festigkeitsklassen, Ausgabe Juli
- Glos P (1995) Beiträge: Festigkeitssortierung und Vollholz—Festigkeitsklassen. Holzbauwerke Bemessung und Baustoffe nach Eurocode 5. Step 1. Fachverlag Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.
- Glos P, Burger N (1998) Maschinelle Sortierung von frisch eingeschnittenem Schnittholz. *Holz Roh- Werkstoff* 56:319–329
- Görlacher R (1984) Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. *Holz Roh- Werkstoff* 42:219–222
- Görlacher R (1990) Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen. Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe