

Einfluss der Baumartenmischung auf die Holzqualität der Buche (*Fagus sylvatica* L.)

Andreas Rais^{1,2}, Jan-Willem van de Kuilen², Hans Pretzsch¹

¹Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München

²Holzforschung München, Holztechnologie, Technische Universität München

Zusammenfassung

Die Rotbuche ist unsere häufigste Laubbaumart in Deutschland. Durch ihre Konkurrenzkraft und ihre morphologische Variabilität kommt sie in verschiedenen Mischungen vor. Ob und inwieweit sich die äußere Variabilität in inneren Holzeigenschaften abbildet, ist Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Dazu wurden 100 Rotbuchen im unterfränkischen Spessart näher untersucht, die aus unterschiedlichen Mischungsformen stammten. Das Material teilte sich auf in fünf gleich große Gruppen zu je 20 Bäumen, kommend aus Buchenreinbeständen und aus den eigentlichen vier Buchenmischbeständen mit den jeweiligen Baumarten Douglasie, Fichte, Kiefer und Eiche. Nach Fällung und Einschnitt wurden die Schnitthölzer maschinell nach Festigkeit sortiert. Dazu wurde der dynamische Elastizitätsmodul (MOE_{dyn}) ermittelt, der sich aus der Rohdichte, der Länge und der Eigenfrequenz ergibt. Dieses Sortierprinzip zeichnet sich durch hohe Durchlaufgeschwindigkeiten und hohe Korrelationen zur wahren Festigkeit aus. Der MOE_{dyn} – als Weiser für die Holzqualität im Bausektor – wurde verschiedenen unabhängigen Variablen wie dem kambialen Alter oder dem Mischungstyp gegenübergestellt. Mit Hilfe des Akaike-Informationskriteriums wurde aus allen möglichen Kombinationen das beste lineare gemischte Modell ausgewählt und geschaut, welche Baumvariablen signifikant auf den MOE_{dyn} wirken.

Die Ergebnisse zeigten Unterschiede der Holzqualität zwischen Mischungstypen. Buchen in Reinbeständen besaßen die höchsten Steifigkeiten. Insbesondere die Mischung mit den Lichtbaumarten Eiche oder Kiefer führte zu signifikanten Qualitätsminderungen bei Buchenbauholz. Daher sollte Buchenbrettschichtholz höherer Klassen (\geq GL 40c) nicht mit Buchen aus diesen Mischungstypen hergestellt werden. Die Untersuchung zeigte zudem, dass die Rohdichte von der Mischung unbeeinflusst ist.

Die Studie unterstreicht, dass die Baumartenmischung ein Grund für die Streuung der Steifigkeitseigenschaften ist. Die Umgestaltung unserer Wälder in Mischwälder beeinträchtigt die Holzqualität.

1 Einleitung

Die Rotbuche ist unsere häufigste Laubbaumart in Deutschland. Ohne menschliches Zutun beständen die heimischen Wälder zu großen Teilen aus buchendominierten Beständen. Ausschlaggebend sind dafür ihre Konkurrenzkraft und ihre morphologische Variabilität, die es ihr erlauben, auf verschiedenen Standorten und in verschiedenen Mischungen zu existieren. Ob und inwieweit sich die äußere Plastizität in inneren Holzeigenschaften abbildet, ist Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Holzqualität ist ein Begriff, der abhängig von der Verwendung unterschiedlich definiert wird. Eine Rolle spielt zudem, auf welcher Stufe der Produktionskette man sich befindet: Die Beurteilung der Holzqualität am (stehenden) Baum kann sich in der Regel nur äußeren Kriterien wie Astdicken oder Schafformen bedienen, wogegen moderne Sägewerke das Schnittholz mit Röntgenscannern durchleuchten, um Rohdichteprofile oder genaue Astverläufe zu erhalten. Für die Verwendung von Schnittholz als Bauholz sind vor allem Steifigkeit und Festigkeit relevant, da Statiker mit diesen Kennwerten Bauwerke designen. Ein sehr guter Prädiktor für die Steifigkeit eines Brettes ist der sogenannte dynamische Elastizitätsmodul (MOE_{dyn}), der häufig in Sägewerken bei der Sortierung von Schnittholz verwendet wird. Solche Maschinen zeichnen sich durch eine hohe Durchlaufgeschwindigkeit und durch eine gute Präzision aus. Holztechnologisch beeinflusst wird der MOE_{dyn} durch den Faserverlauf, den Mikrofibrillenwinkel und das Auftreten von Ästen.

2 Material und Methode

Die untersuchten Schnitthölzer stammten von insgesamt 100 Rotbuchen (*Fagus sylvatica* L.) aus dem Spessart. Dieses Mittelgebirge liegt in Unterfranken im Norden von Bayern und ist neben seinen Eichen berühmt durch das Vorkommen von ausgedehnten Buchenbeständen. In den Forstbetrieben Heigenbrücken und Rothenbuch der Bayerischen Staatsforsten wurden im Winter 2017/2018 die untersuchten Bäume gefällt. Die Bestände sind in der Vergangenheit stammzahl- und vorratsreich erzogen und vorwiegend niederdurchforstet worden. Die Bäume konnten folgenden Mischungsformen zugeordnet werden: Buchenreinbestand und vier Mischbeständen mit jeweils der Baumart Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco), Fichte (*Picea abies* L. Karst.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Eiche (*Quercus petraea* (Matt.) L.). Die Stichprobengröße verteilte sich gleichmäßig auf die fünf Mischungsformen, so dass 20 Bäume pro Mischungsform vorlagen (Abbildung 1).

Der Einschnitt der insgesamt über 250 etwa 4,1 m langen Abschnitte erfolgte im Sägewerk Försch in Gössenheim nahe Lohr am Main. Mit einer Bandsäge wurden über 2000 Schnitthölzer verteilt auf zwei Querschnitte – 50 × 150 mm² und 40 × 80 mm² – eingesägt. Um die Lage jedes Schnittholzes auch nach dem Einschnitt noch zweifelsfrei bestimmen zu können, wurden auf die Hirnholzseiten der Rundholzabschnitte mit Hilfe einer Schablone ein Kreuz und Kreise unterschiedlicher Radien gesprüht (Abbildung 2). Letztere beinhalteten die Information über den Abstand zum Mark, das Kreuz wiederum diente zur Identifikation der Himmelsrichtung.

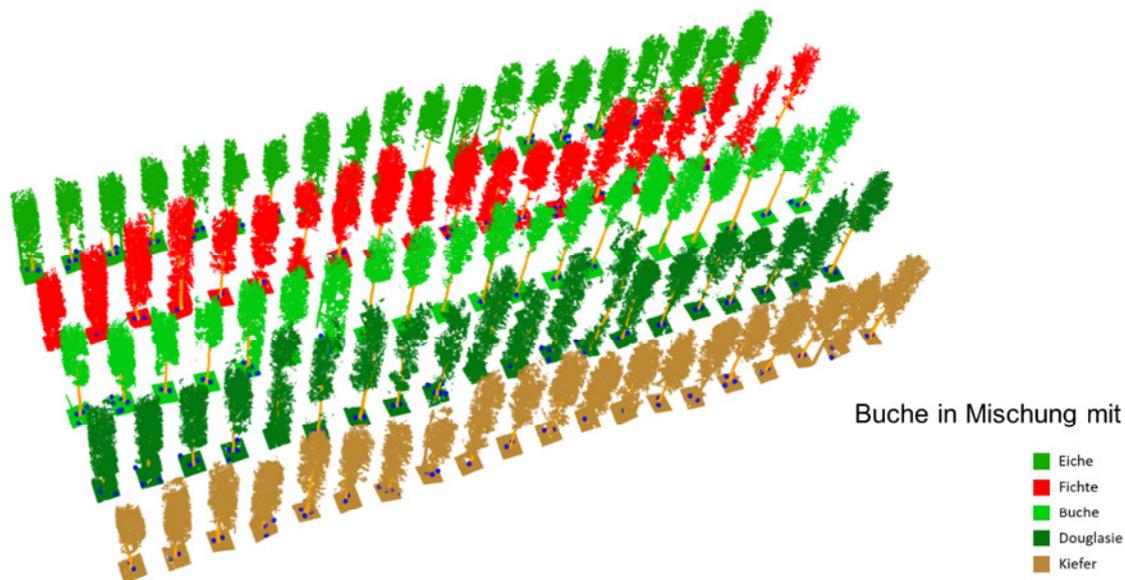


Abbildung 1 – Alle 100 Rotbuchen aus den fünf verschiedenen Mischungen wurden im Projekt mit einem terrestrischen Laserscanner (TLS) aufgenommen. Die Abbildung soll einen besseren Überblick über die Stichprobe zeigen, wobei die TLS-Punktewolken aller Bäume künstlich auf eine Ebene projiziert wurden.

Bei der Fällung der Bäume wurden, verteilt über die Stammlänge, ebenso Stammscheiben gewonnen (Abbildung 2). Die Analyse der Scheiben erfolgte mit einem digitalen Positiometer (Birtz GmbH, Gerasdorf bei Wien, Austria). Die Jahrringbreiten wurden in allen vier Haupthimmelsrichtungen bestimmt. Das Verschneiden der Informationen, kommend von der Schablone und aus dem Jahrringlabor, ermöglichte für jedes Schnittholz die Ermittlung des durchschnittlichen kambialen Alters und der durchschnittlichen Jahrringbreite.

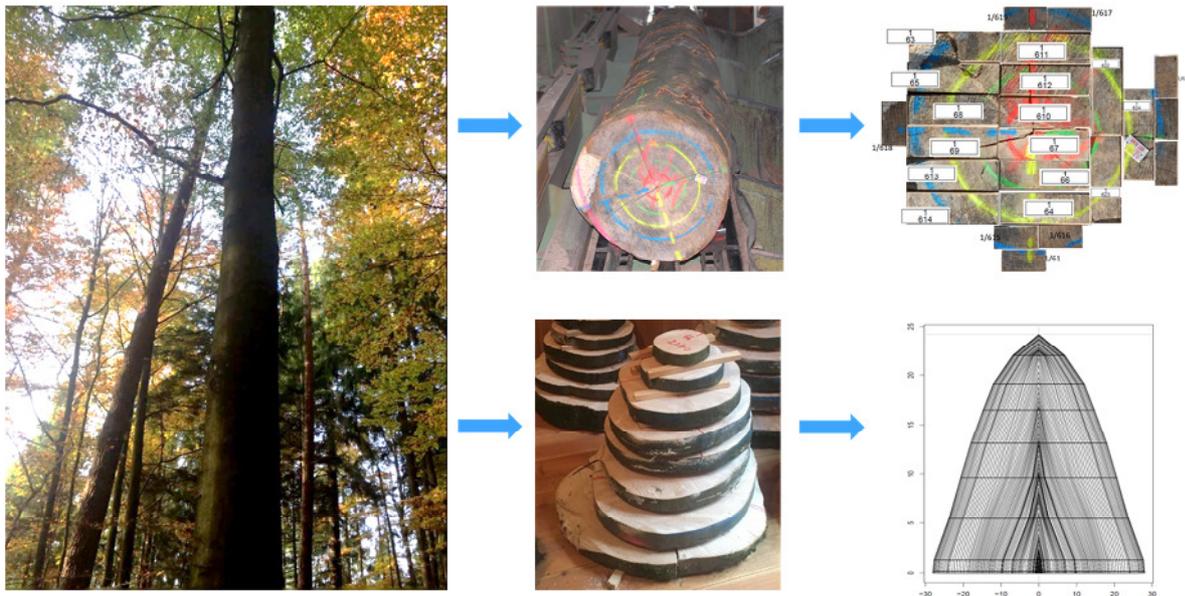


Abbildung 2– Für jedes Schnittholz waren die axiale und radiale Position im Baum bekannt. Ebenso wusste man das kambiale Alter und die Jahrringbreiten jedes Schnittholzes.

Der MOE_{dyn} – ein Maß für die Steifigkeit – wurde an jedem Schnittholz ermittelt. Eingangsgrößen waren die Rohdichte (ρ), die Eigenfrequenz (f) und die Länge (l) (Abbildung 3). Zusätzlich wurde die Holzfeuchte (u) der getrockneten Schnitthölzer gemessen, um den MOE_{dyn} für alle Schnitthölzer auf eine Holzfeuchte von 12 % zu standardisieren. Dazu wurde der $MOE_{dyn,12\%}$ gemäß der gängigen Formel aus EN 384 umgerechnet, die unter dem Fasersättigungsbereich besagt, dass bei einem absoluten Rückgang der Holzfeuchte um 1 % der MOE_{dyn} um 1 % steigt. Die Rohdichte wurde aus der Masse und dem Volumen eines Schnittholzes berechnet.



Abbildung 3– Der MOE_{dyn} steht stellvertretend für die Holzqualität, er ist ein direktes Maß für die Steifigkeit von Bauholz.

Mit Hilfe gemischter Modelle wurde festgestellt, ob der MOE_{dyn} von einer der folgenden erklärenden Parametern abhängt: Axiale Stammposition *BlochTyp*, kambiales Alter *KamAlter*, Jahrringbreite *JRB* oder Mischungstyp *Mischung*. Die Grundform mit allen möglichen erklärenden Parametern sah wie folgt aus:

$$MOE_{dyn_{ij}} = a_0 + a_1 \times \text{Mischung} + a_2 \times \text{JRB} + a_3 \times \text{KamAlter} + a_4 \times \text{BlochTyp} + b_j + \varepsilon_{ij}$$

Dabei stand der Index i für das Brett, der Index j für den Baum. Die Regressionskoeffizienten lauteten a_0 , a_1 , a_2 , a_3 und a_4 . Die unabhängige Variable *Mischung* war kategorisch, alle anderen unabhängigen Variablen numerisch. Die Variable b_j beschrieb einen zufälligen Effekt, da die Stichprobe nicht vollständig zufällig war: Einige Schnitthölzer stammten von ein und demselben Baum. Die zufälligen Effekte wurden als normalverteilt mit Mittelwert Null und konstanter Varianz angenommen. Der Fehlerterm ε_{ij} war normalverteilt mit dem Erwartungswert Null und konstanter Varianz.

Alle möglichen Kombinationen von Modellen aus vier erklärenden Variablen ($n = 4$) wurden erzeugt mit $\sum_{k=1}^n n! / [(n - k)! \times k!]$, wobei k die Anzahl der unabhängigen Variablen wiedergab. Das Akaike-

Informationskriterium (AIC) wurde als Anpassungskriterium für die Auswahl des besten (multiplen) linearen Modells verwendet. Es wurde schließlich getestet, ob dieses Modell besser ist als ein Modell mit nur zufälligen Effekten. Vom ausgewählten Modell wurden die festen und zufälligen Effekte geschätzt und ihre Signifikanzniveaus bestimmt.

Die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-679 für Brettschichtholz aus Buche und Brettschichtholz für Buchenhybridträger definiert verschiedene Brettschichtholzklassen. Für die höheren Brettschichtholzklassen GL 40c, GL 44c und GL 48c werden neben visuellen Anforderungen an die Lamellenqualität zusätzlich auch Mindestgrenzen für den MOE_{dyn} gestellt. Diese Schwellen liegen bei 14000 bzw. 15000 N mm⁻². Zur Verdeutlichung des Einflusses der Mischung wurde für jeden Mischungstyp der Funktionswert des Modells berechnet. Als Eingangsdatensatz wurde jeweils die gesamte Stichprobe von fast 1000 Schnitthölzern gewählt, um ceteris-paribus-Bedingungen in allen anderen unabhängigen Variablen zu gewährleisten. Der Effekt bei dem Ausbeuteunterschied war daher der reine Effekt, der in Folge des Mischungstyps entsteht.

3 Resultate

Die hier gezeigten Ergebnisse basieren auf einem Teildatensatz, der zum Zeitpunkt der Ertragskundetagung vorlag und dort in der Präsentation vorgestellt wurde. Die Stichprobengröße – ausgedrückt als Anzahl der Bretter – betrug 1065 und kam von allen 100 Bäumen.

Es wurden insgesamt 15 Modelle erzeugt. Das Modell mit dem geringsten AIC-Wert beinhaltetete alle zur Verfügung stehenden unabhängigen Variablen trotz des implementierten Prinzips der Parsimonie (Occam’s razor). Die Regressionskoeffizienten sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Das Modell in Tabelle 1 war besser als das Modell, welches nur die Zufallseffekte beinhaltetete.

Tabelle 1 – Das beste Modell zur Beschreibung des MOE_{dyn} beinhaltet alle unabhängigen Variablen, die grundsätzlich zur Verfügung standen.

	Offset	Kambiales Alter	Blochart ¹⁾	Jahringbreite	Douglasie	Fichte	Eiche	Kiefer
Regressionskoeffizient	15692	+15,8	-802	+22,1	-451	-452	-1533	-2130
Einheit	N mm ⁻²	N mm ⁻² yrs ⁻¹	N mm ⁻²	N mm ⁻² mm ⁻¹	N mm ⁻²	N mm ⁻²	N mm ⁻²	N mm ⁻²
p-Wert		< 0,0001	< 0,0001	0,721		0,001 ³⁾		

- 1) Der untere Abschnitt, der Erdstammabschnitt, ist die erste Länge und hat den numerischen Wert „1“, der zweite Abschnitt hat den numerischen Wert „2“.
- 2) Die Mischung bzw. der Mischungstyp ist kategorisch; als Referenz fungiert die Holzqualität des Buchenreinbestands.
- 3) Dieser Wert entstammt der einfachen Varianzanalyse und zeigt, dass es auf dem 5 %-Signifikanzniveau generelle Unterschiede zwischen den Mischungstypen gibt.

Vergleicht man die Ausprägungen des Mischungstyps paarweise, so zeigte sich, dass die Unterschiede nicht immer signifikant waren. Tabelle 2 zeigt alle p-Werte, wobei die hervorgehobenen Werte signifikante Unterschiede zwischen den Paaren auf dem 5 %-Signifikanzniveau darstellen.

Tabelle 2 – Die jeweiligen p-Werte für die paarweisen Vergleiche (post-hoc-Tests) innerhalb der kategorischen, unabhängigen Variable des Mischungstyps.

	Buche	Douglasie	Fichte	Eiche	Kiefer
Buche		0,326	0,322	0,001	0,000
Douglasie			0,998	0,022	0,000
Fichte				0,022	0,000
Eiche					0,189
Kiefer					

Unter der Verwendung des abgeleiteten Modells und des gesamten Datensatzes wurden für jeden Mischungstyp die MOE_{dyn} -Werte berechnet. Der Unterschied der einzelnen Verteilungen bezüglich des Modellwertes für den MOE_{dyn} lag somit lediglich im Mischungstyp begründet. Abbildung 4 illustriert die Ausbeuten in Abhängigkeit des Mischungstyps für zwei separate Schwellen: 14000 und 15000 N mm⁻². Die Holzqualität der Rotbuche sank in der folgenden Reihung des Mischungstyps (Tabelle 1): Buchenreinbestand > Buchen-Douglasien-Mischbestand > Buchen-Fichten-Mischbestand > Buchen-Eichen-Mischbestand > Buchen-Kiefern-Mischbestand. Bei der Ausbeute zeigte sich selbstverständlich die gleiche Reihung (Abbildung 4).

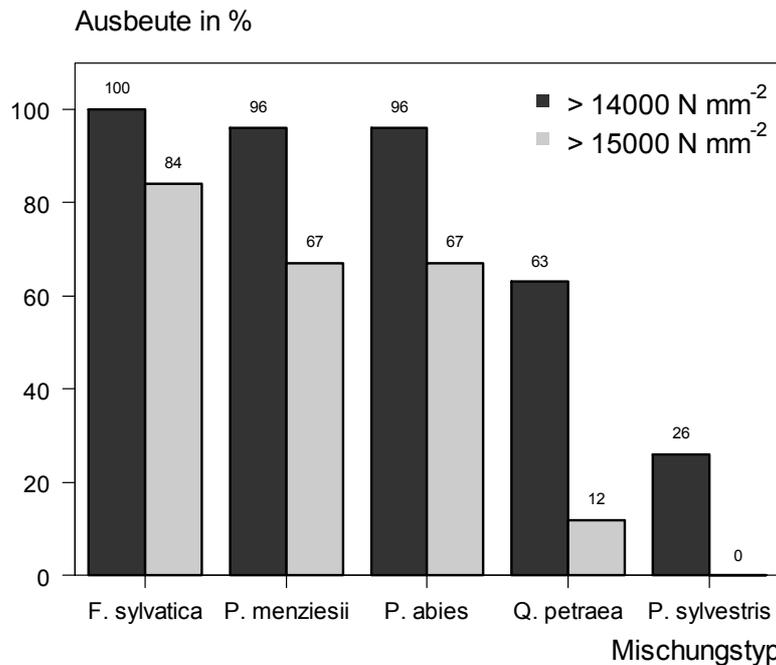


Abbildung 4– Der Ausbeuteunterschied für zwei Schwellen (14000 N mm^{-2} und 15000 N mm^{-2}), der lediglich auf den Mischungstyp zurückzuführen war.

4 Diskussion

Europäische Festigkeitsklassen nach EN 338 definieren sich über Festigkeit, Steifigkeit und Rohdichte. Einer Charge Schnittholz (z.B. C24) können daher definierte Werte zugeordnet werden, die dann der Weiterverarbeiter und Statiker verwenden. Der Steifigkeitswert ist definiert über den statischen Elastizitätsmodul (EN 14081, EN 408), der wiederum sehr treffsicher über den MOE_{dyn} geschätzt werden kann. Wohl aus diesem Grund wurde in einer allgemein bauaufsichtlichen Zulassung von Buchenbrettschichtholz als Sortierkriterium neben der Sortierklasse nach DIN 4074 eine Anforderung gestellt, die auf dem MOE_{dyn} beruht. Diese zusätzliche Anforderung gilt bei Brettschichtholz von hoher Festigkeitsklasse ($\geq \text{GL } 40\text{c}$). Für die Außenlamellen von GL 44c und GL 48c liegt die Schwelle sogar bei 15000 N mm^{-2} . Auf Grundlage der verwendeten Stichprobe ist dies nicht mit Buchen aus Mischbeständen mit Eiche oder Kiefer möglich. Die aus diesen beiden Lichtbaumarten resultierenden Bestandesstrukturen scheinen das Wachstum und die Holzqualität der Buche negativ zu beeinflussen. Holztechnologisch kann dies an einer Änderung von Astdurchmessern, in einer Modifikation der Faserabweichung oder in einer Veränderung des Mikrofibrillenwinkels liegen. Buchenholz aus Reinbeständen lag über dem Schwellenwert von 15000 N mm^{-2} mit 84 % der Schnittware. Laut der gezeigten Studie muss man einem Hersteller von Buchenbrettschichtholz klar raten, Buchen aus Buchenreinbeständen zu erwerben.

Die Anzahl von insgesamt knapp über 1000 Schnitthölzer, die in dieser Untersuchung verwendet wurden, scheint auf den ersten Blick hoch. Allerdings stammt die Gesamtheit der Schnittware von nur 100 Bäumen. Es wäre wünschenswert gewesen, die Stichprobe zu erhöhen, jedoch ist der logistische und finanzielle Aufwand für eine umfassendere Analyse ebenfalls hoch. Statistisch wurde die verbundene Nestung der Datenstruktur versucht, mit gemischten Modellen zu berücksichtigen. Eine weitere wichtige Frage ist, wie repräsentativ die Stichprobe der ausgewählten Rotbuchen ist? Stehen sie stellvertretend für die Gesamtheit der Rotbuchen im Bestand? Dies kann nicht abschließend geklärt werden, da die innere Holzqualität nicht von anderen Bäumen bestimmt wurde. Jedoch wurden äußere Baumeigenschaften von allen 100 Rotbuchen inklusive Bestandsbäumen mit Hilfe des terrestrischen Laserscannings erfasst. Durch die Kenntnis der Durchmesser- oder kronenformbeschreibenden Variablen lässt sich die gezogene Stichprobe bewerten.

Die Rohdichte ist ein Bestandteil der mathematischen Formel für den dynamischen Elastizitätsmodul. Die Rohdichte der Schnitthölzer wurde gemessen, war aber nicht als singuläre Größe Bestandteil der Untersuchung. Eine statistische Analyse wurde dennoch gemacht, aber weder als Hypothese formuliert noch als Ergebnis gezeigt. Dennoch hier in Kürze, was man auf Grund der hiesigen Stichprobe über die

Rohdichte und ihre Abhängigkeit von der Mischung sagen kann. Die Buche zählt hinsichtlich des Holzaufbaus zu den zerstreutporigen Laubhölzern. Bildhaft gesprochen wird über die ganze Vegetationsperiode hinweg, in der auch das eigentliche Holz gebildet wird, der gleiche Mix aus Fasern und Gefäßen gebildet. Es kommt – anders als bei Eiche oder Esche – weder zu einer Konzentrierung der Gefäßbildung im frühen Sommer noch zur Faserbildung im Sommer. Bei ringporigen Laubhölzern ist zudem die Breite des Frühholzes relativ konstant, das Spätholz dagegen in der Breite variabel. Sind die Wachstumsverhältnisse in einem Jahr gut, bedeutet dies deshalb einen breiten Jahrring und damit einhergehend einen hohen Spätholzanteil, der wiederum zu einer hohen Rohdichte führt. Im Klartext: breiter Jahrring gleich hohe Rohdichte. Die Rotbuche dagegen zeigt diese Abhängigkeit der Jahrringbreite von der Rohdichte eher nicht. Dies ist womöglich ein Grund, weshalb die Mischung keinen Einfluss auf die Rohdichte in der vorliegenden Untersuchung zeigt. Im Generellen schwankt die Rohdichte der Buche gering.

5 Literatur

- AKAIKE, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Automat. Contr.* 19, 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- BARBEITO, I., DASSOT, M., BAYER, D., COLLET, C., DRÖSSLER, L., LÖF, M., DEL RIO, M., RUIZ-PEINADO, R., FORRESTER, D.I., BRAVO-OVIEDO, A., PRETZSCH, H., 2017. Terrestrial laser scanning reveals differences in crown structure of *Fagus sylvatica* in mixed vs. pure European forests. *For. Ecol. Manage.* 405, 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.043>
- BAYER, D., SEIFERT, S., PRETZSCH, H., 2013. Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning. *Trees* 27, 1035–1047. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0854-4>
- BRAVO-OVIEDO, A., PRETZSCH, H., AMMER, C., ANDENMATTEN, E., BARBATI, A., BARREIRO, S., BRANG, P., BRAVO, F., COLL, L., CORONA, P., DEN OUDEN, J., DUCEY, M.J., FORRESTER, D.I., GIERGICZNY, M., JACOBSEN, J.B., LESINSKI, J., LÖF, M., MASON, W.L., MATOVIC, B., METSLAID, M., MORNEAU, F., MOTIEJUNAITE, J., O'REILLY, C., PACH, M., PONETTE, Q., DEL RIO, M., SHORT, I., SKOVGAARD, J.P., SOLIÑO, M., SPATHELF, P., STERBA, H., STOJANOVIC, D., STRELCOVA, K., SVOBODA, M., VERHEYEN, K., VON LÜPKE, N., ZLATANOV, T., 2014. European Mixed Forests: definition and research perspectives. *For. Syst.* 23, 518. <https://doi.org/10.5424/fs/2014233-06256>
- DIELER, J., PRETZSCH, H., 2013. Morphological plasticity of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed-species stands. *For. Ecol. Manage.* 295, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.049>
- DIN 4074-5:2008-12, Strength grading of wood – Part 5: Sawn hard wood; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2008.
- ELLENBERG, H., LEUSCHNER, C., 2010. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- EN 384:2016+A1:2018, Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density; DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2019.
- GÖRLACHER, R., 1984. Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. *Holz als Roh- und Werkst.* 42, 219–222. <https://doi.org/10.1007/BF02607231>
- HÖWLER, K., VOR, T., SEIDEL, D., ANNIGHÖFER, P., AMMER, C., 2019. Analyzing effects of intra- and interspecific competition on timber quality attributes of *Fagus sylvatica* L.—from quality assessments on standing trees to sawn boards. *Eur. J. For. Res.* 138, 327–343. <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01173-7>
- JUCHHEIM, J., ANNIGHÖFER, P., AMMER, C., CALDERS, K., RAUMONEN, P., SEIDEL, D., 2017. How management intensity and neighborhood composition affect the structure of beech (*Fagus sylvatica* L.) trees. *Trees* 31, 1723–1735. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1581-z>
- KOVRYGA, A., STAPEL, P., VAN DE KUILEN, J.W.G., 2019. Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and beech. *Wood Mater. Sci. Eng.* 1–14. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1596158>
- LEGENDRE, P., LEGENDRE, L., 1988. *Numerical ecology*, Second eng. ed, Developments in environmental modelling, 20. Elsevier, Amsteram.

- MERINO, A., REAL, C., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G., RODRÍGUEZ-GUITIÁN, M.A., 2007. Forest structure and C stocks in natural *Fagus sylvatica* forest in southern Europe: The effects of past management. *For. Ecol. Manage.* 250, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.016>
- NICKEL, M., KLEMMT, H.-J., PRETZSCH, H., 2007. Unter optimalen Wuchsbedingungen in Bayern - Durchforstungsreaktion der Buche. *AFZ/Der Wald* 13, 676–679.
- PRETZSCH, H., 2014. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *For. Ecol. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.027>
- PRETZSCH, H., BIBER, P., 2005. A Re-Evaluation of Reineke's Rule and Stand Density Index. *For. Sci.* 51, 17.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., SCHÜTZE, G., KEMMERER, J., UHL, E., 2018. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870. *For. Ecol. Manage.* 429, 589–616. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.045>
- PRETZSCH, H., RAIS, A., 2016. Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures: review and perspectives. *Wood Sci. Technol.* 50. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0827-z>