

Mechanische Kennwerte von tansanischem Kiefernholz



Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.

Lehrstuhl

Prof. dr. ir. Jan-Willem van de Kuilen
Professur für Holztechnologie
School of Engineering and Design
Materials Engineering
Technische Universität München

Betreuerin / Betreuer

Lucas Bienert, M. Sc.
Dr.-Ing. Andriy Kovryga

Eingereicht von

Simon Kramer, B. Eng.
03755238

Eingereicht am

15. Mai 2024 in München

Titelbilder

Prüfanordnung der Biegeprüfung am Lehrstuhl für Baukonstruktion und Holzbau der TUM (links)

Prüfanordnung der Zugprüfung an der TUM FG Holztechnologie (rechts oben)

Prüfanordnung der Keilzinkenprüfung am Lehrstuhl für Baukonstruktion und Holzbau der TUM (rechts unten)

Kurzfassung „Mechanische Kennwerte von tansanischem Kiefernholz“

Im Auftrag des tansanischen Wohnungsbauunternehmens CPS werden in dieser Masterarbeit die mechanischen Kennwerte der tansanischen Kiefernholzart *Pinus patula* untersucht. Angesichts des weltweiten Bevölkerungswachstums und einer nachhaltigen Entwicklung Tansanias sollen dort geplante Neubauten überwiegend aus einheimischen Holzressourcen errichtet werden [1]. Bisher wird das einheimische Kiefernholz jedoch nur für informelles Bauen, wie zum Beispiel im Möbelbau oder als Brennholz verwendet [2].

Aufgrund dessen wird in dieser Masterarbeit das Potential der oben genannten Kiefernholzart für tragende Zwecke eingehend untersucht. Dabei werden die festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften, wie Festigkeit, Steifigkeit und Rohdichte an insgesamt 300 Prüfkörpern aus der *Sao Hill Industries Ltd.* Forstplantage in Mufindi, Tansania, nach EN 408 [3] ermittelt. An jeweils 100 Vollholzproben wird die Zug- und Biegefestigkeit sowie die Zug- und Biegesteifigkeit in Faserrichtung bestimmt. An den übrigen 100 Prüfkörpern wird die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen untersucht. Anhand der Prüfergebnisse der Vollholzproben erfolgt eine Sortierung in die Festigkeitsklassen nach EN 338 [4]. Dafür werden neben der optimalen Sortierung nach EN 14081-2 [5] insgesamt fünf weitere Sortiermethoden untersucht. Die visuelle Sortierung wird dabei nach der deutschen Sortiernorm DIN 4074-1 [6] durchgeführt. Die maschinelle Sortierung erfolgt auf Grundlage des dynamischen E-Moduls. Abschließend wird ein Vergleich der unterschiedlichen Festigkeitsprofile aus den Zug- und Biegeprüfergebnissen angestellt.

In den Prüfungen werden die, in der Literatur genannten, niedrigen mechanischen und physikalischen Eigenschaften von *Pinus patula* bestätigt. Die ermittelte mittlere Zugfestigkeit der Vollholzproben liegt bei $14,1 \text{ N/mm}^2$ und die mittlere Biegefestigkeit bei $25,2 \text{ N/mm}^2$. Bei den keilgezinkten Proben wird eine mittlere Biegefestigkeit von $23,8 \text{ N/mm}^2$ nachgewiesen. Demnach weist die untersuchte Kiefernholzart im Vergleich zu europäischem Kiefernholz (*Pinus sylvestris*) nur ein begrenztes Potential zur Verwendung für tragende Zwecke auf. Im Allgemeinen werden die höchsten Ausbeuten bei der Festigkeitssortierung von *Pinus patula* mittels maschineller Sortierung erzielt. Aufgrund der unmittelbaren Anwendbarkeit der Sortierung vor Ort und den hohen Ausbeuten der maschinellen Sortierung, wird die Festigkeitssortierung von *Pinus patula* nach dem dynamischen E-Modul empfohlen. Dieser wird unter Verwendung einer voreingestellten mittleren Rohdichte über die Eigenfrequenz berechnet. Die Ausbeute eines solchen Maschinensystems liegt beispielsweise in der Zugfestigkeitsklasse T14 bei 10% der Grundgesamtheit. Der Vergleich der Festigkeitsprofile ergibt zudem ein mittleres Verhältnis von $f_{t,0,k}/f_{m,k} = 0,50$ und ist vergleichbar mit dem Festigkeitsverhältnis von Kiefernholz aus Irland und Großbritannien.

Die niedrigen mechanischen Kennwerte von *Pinus patula* sind vor allem auf vergleichsweise kurze Umtriebszeiten, große Gesamtastflächen und hohe Rohdichteschwankungen der Prüfkörper zurückzuführen. Deshalb sollten sich weitere Forschungsarbeiten mit der Fragestellung beschäftigen, wie sich das Potential von *Pinus patula* für tragende Zwecke verbessern lässt.

Abstract “Mechanical properties of Tanzanian Pine wood“

On behalf of the Tanzanian housing construction company CPS, this master's thesis examines the mechanical properties of the Tanzanian pine species *Pinus patula*. In view of the global population growth and sustainable development of Tanzania, the planned buildings should predominantly be constructed from domestic wood resources [1]. However, local Tanzanian pine is currently used for informal construction such as furniture making or as firewood [2].

Therefore, the potential of the above-mentioned pine wood species for load-bearing purposes is examined in this master's thesis. The grade determining properties, such as strength, stiffness and density, are investigated according to EN 408 [3] on a total of 300 specimens from the *Sao Hill Industries Ltd.* plantation in Mufindi, Tanzania. The tensile and bending strength and stiffness in fiber direction are determined on 100 solid wood samples each. The remaining 100 specimens are assessed for the bending strength of finger-jointed connections. Based on the test results of the solid wood samples, grading into strength classes according to EN 338 [4] is carried out. In addition to the optimum grading according to EN 14081-2 [5], a total of five other grading methods are investigated. Visual grading is conducted according to the German grading standard DIN 4074-1 [6]. Mechanical grading is carried out on the basis of the dynamic modulus of elasticity. Finally, a comparison of the different strength profiles is made.

The test results basically confirmed the low mechanical and physical properties of *Pinus patula* from the literature. The average tensile strength of the solid wood samples is 14.1 N/mm^2 and the average bending strength is 25.2 N/mm^2 . An average bending strength of 23.8 N/mm^2 was found for the finger-jointed samples. Thus, compared to European pine wood (*Pinus sylvestris*), the investigated pine wood species shows limited potential for load-bearing purposes. In general, the highest yields in strength grading of *Pinus patula* are achieved by mechanical grading. Due to the immediate application of on-site grading and the high yields of machine grading, strength grading of *Pinus patula* according to the dynamic modulus of elasticity via the natural frequency, calculated by using a preset mean density, is recommended. The yield of such a machine system is, for example, 10% of the population in the tensile strength class T14. Additionally, the comparison of the strength profiles results an average ratio of $f_{t,0,k}/f_{m,k} = 0.50$ and is therefore comparable to the strength ratio of pine wood from Ireland and Great Britain.

The low mechanical properties of *Pinus patula* are mainly caused by the comparatively short rotation times, large knot areas and high-density fluctuations of the specimens. Further research should therefore address the question of how the potential of *Pinus patula* for load-bearing purposes can be improved.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung „Mechanische Kennwerte von tansanischem Kiefernholz“	I
Abstract “Mechanical properties of Tanzanian Pine wood“	III
Inhaltsverzeichnis	V
Symbole und Abkürzungen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Forschungsthematik und Hintergrund	1
1.2 Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit	3
2 Theoretischer Hintergrund der Arbeit	5
2.1 Grundlagen der Festigkeitssortierung von Nadelholz	5
2.2 Zusammenfassung europäischer Normen für die BSH-Herstellung	12
2.3 Stand des Wissens zu Kiefernholz.....	13
2.3.1 Europäisches Kiefernholz	13
2.3.2 Afrikanisches Kiefernholz.....	17
3 Material und Methode	23
3.1 Material	23
3.2 Bestimmung mechanischer und physikalischer Eigenschaften	27
3.3 Statistische Grundlagen	35
3.4 Bestimmung der charakteristischen Kennwerte.....	38
3.5 Optimale Sortierung	40
3.6 Visuelle Sortierung	42
3.7 Maschinelle Sortierung.....	50
3.8 Kombinierte maschinelle und visuelle Sortierung	53
3.9 Vergleich der Festigkeitsprofile aus Zug- und Biegefestigkeit	54

4	Ergebnisse	55
4.1	Zugversuche nach EN 408 [3]	55
4.2	Biegeversuche nach EN 408 [3]	60
4.2.1	Ergebnisse am Vollholz	60
4.2.2	Ergebnisse an Keilzinkenverbindungen	66
5	Sortierung auf Grundlage der Zugprüfung	69
5.1	Optimale Sortierung	69
5.2	Visuelle Sortierung	72
5.2.1	Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 [6]	72
5.2.2	Optimierte visuelle Sortierregeln	73
5.3	Maschinelle Sortierung	75
5.4	Kombinierte maschinelle und visuelle Sortierung	78
5.5	Vergleich der Sortiermethoden	80
6	Sortierung auf Grundlage der Biegeprüfung	82
6.1	Optimale Sortierung	82
6.2	Visuelle Sortierung	85
6.2.1	Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 [6]	85
6.2.2	Optimierte visuelle Sortierregeln	86
6.3	Maschinelle Sortierung	88
6.4	Kombinierte maschinelle und visuelle Sortierung	91
6.5	Vergleich der Sortiermethoden	93
7	Vergleich der Festigkeitsprofile aus Zug- und Biegefestigkeit	95
7.1	Umrechnung von charakteristischer Biegefestigkeit in charakteristische Zugfestigkeit	95
7.2	Umrechnung von charakteristischer Zugfestigkeit in charakteristische Biegefestigkeit	97
8	Diskussion	99
9	Fazit und Ausblick	106
	Abbildungsverzeichnis	107
	Tabellenverzeichnis	110

Literaturverzeichnis.....	113
Anhang A.....	118
Anhang B.....	136
Anhang C.....	145

Symbole und Abkürzungen

CPS	Community Projects Services
KVH	Konstruktionsvollholz
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
EC 5	Eurocode 5
TZS	Tanzania Standard
DIN	Deutsches Institut für Normungen
EN	Europäische Norm
SANS	South African National Standard
ISO	Internationale Organisation für Normung
BS	British Standard
VK	Variationskoeffizient
R	Korrelationskoeffizient nach Pearson
R ²	Bestimmtheitsmaß
DEK	Einzelastkriterium nach den Sortierregeln für Kanthölzer der DIN 4074-1 [6]
DEB	Einzelastkriterium nach den Sortierregeln für Bretter der DIN 4074-1 [6]
DAB	Astansammlungskriterium nach den Sortierregeln für Bretter der DIN 4074-1 [6]
DSB	Schmalseitenastkriterium nach den Sortierregeln für Bretter der DIN 4074-1 [6]
JRB	mittlere Jahrringbreite [mm]
IP ₁	IP basierend auf der Eigenfrequenz und der individuellen Rohdichte [kN/mm ²]
IP ₂	IP basierend auf der Eigenfrequenz und der mittleren Rohdichte [kN/mm ²]
IP ₃	IP basierend auf der Rohdichte [kg/m ³]
f _{t,0}	Zugfestigkeit in Faserrichtung [N/mm ²]

$f_{t,0,k}$	5%-Quantil der Zugfestigkeit in Faserrichtung [N/mm^2]
$E_{t,0}$	Zug-E-Modul in Faserrichtung [kN/mm^2]
$E_{t,12}$	Zug-E-Modul in Faserrichtung angepasst an 12% Holzfeuchte [kN/mm^2]
$E_{t,0,mean}$	charakteristischer Mittelwert des Zug-E-Moduls in Faserrichtung [kN/mm^2]
f_m	Biegefestigkeit in Faserrichtung [N/mm^2]
$f_{m,k}$	5%-Quantil der Biegefestigkeit in Faserrichtung [N/mm^2]
$E_{m,l}$	lokales Biege-E-Modul in Faserrichtung [kN/mm^2]
$E_{m,l,12}$	lokales Biege-E-Modul in Faserrichtung angepasst an 12% Holzfeuchte [kN/mm^2]
$E_{m,g}$	globales Biege-E-Modul in Faserrichtung [kN/mm^2]
$E_{m,g,12}$	globales Biege-E-Modul in Faserrichtung angepasst an 12% Holzfeuchte [kN/mm^2]
$E_{m,0,mean}$	charakteristischer Mittelwert des lokalen Biege-E-Moduls in Faserrichtung [kN/mm^2]
$\rho_{t,12}$	Rohdichte der Zugprüfkörper angepasst an 12% Holzfeuchte [kg/m^3]
$\rho_{t,k}$	5%-Quantil der Rohdichte der Zugprüfkörper [kg/m^3]
$\rho_{m,12}$	Rohdichte der Biegeprüfkörper angepasst an 12% Holzfeuchte [kg/m^3]
$\rho_{m,k}$	5%-Quantil der Rohdichte der Biegeprüfkörper [kg/m^3]
u_{stat}	Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der statischen Prüfung [%]
u_{dyn}	Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der dynamischen Prüfung [%]
f_{freq}	Eigenfrequenz [Hz]
$f_{t,freq}$	Eigenfrequenz der Zugprüfkörper [Hz]
$f_{m,freq}$	Eigenfrequenz der Biegeprüfkörper [Hz]
E_{dyn}	dynamischer E-Modul auf Grundlage der Eigenfrequenzmessung [kN/mm^2]
$E_{t,dyn,12}$	dynamischer E-Modul der Zugprüfkörper angepasst an 12% Holzfeuchte [kN/mm^2]
$E_{m,dyn,12}$	dynamischer E-Modul der Biegeprüfkörper angepasst an 12% Holzfeuchte [kN/mm^2]

1 Einleitung

1.1 Forschungsthematik und Hintergrund

In den Jahren 1960 bis 2022 hat die Bevölkerung Tansanias einen beachtlichen Zuwachs verzeichnet. Nach dem *United Nations Department of Economic and Social Affairs*, Abteilung für wirtschaftliche und soziale Angelegenheiten der Vereinten Nationen [7], erhöhte sich in diesen 62 Jahren die Einwohnerzahl von rund 10,1 Millionen auf etwa 65,5 Millionen. Aufgrund dieses enormen Bevölkerungswachstums steht die Vereinigte Republik Tansania nun vor der Herausforderung, bis zum Jahr 2060 etwa 300.000 zusätzliche Wohnungen pro Jahr zu errichten [1]. Der neue Wohnraum soll vor allem in den urbanen Zentren entstehen, in denen bis 2050 voraussichtlich rund 76 Millionen Einwohner Tansanias leben werden [1]. Um dem extremen Bedarf an Wohnraum und der damit verbundenen Infrastruktur gerecht zu werden, wird es in den kommenden Jahrzehnten zu einer erheblichen Steigerung der Bauaktivitäten in den Städten Ostafrikas kommen.

Im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung Tansanias unter Berücksichtigung des Ziels der Treibhausgasneutralität bis 2050, soll ein Großteil der geplanten Neubauten durch die Verwendung einheimischer Holzressourcen realisiert werden [1]. Tansania verfügt über beträchtliche Waldressourcen, darunter vor allem Ebenholz-, Eukalyptus- und Kieferbestände [8]. In der europäischen Baubranche zählt Kiefernholz bereits jetzt zu den wichtigsten Holzarten für tragende Zwecke [9]. Da sich der Holzbau in Tansania noch nicht flächendeckend etabliert hat und es nach wie vor nur begrenztes Wissen über die mechanischen Eigenschaften der tansanischen Kiefernholzarten gibt [10], wird dieses bislang nur zur Herstellung von Möbeln, Brennholz und Paletten sowie zur Gewinnung von Harz und Gummi verwendet [2]. Langfristig gesehen, soll sich aber eine nachhaltige Wertschöpfungskette entwickeln, die von der Holzernte bis zum Bau von ein- und mehrgeschossigen Gebäuden reichen soll [1]. Bisher wird das Holz für Bauzwecke in Tansania jedoch noch aus Europa importiert [11].

Um Bauholz in Europa für tragende Zwecke wie Konstruktionsvollholz (KVH), Brettschichtholz (BSH) oder Brettsperrholz (BSP) einsetzen zu dürfen, muss es zwingend nach seiner Festigkeit sortiert sein [4]. Noch nicht näher untersuchte Holzarten, wie beispielsweise die tansanische Kiefernholzart *Pinus patula*, müssen dabei eine Reihe an europäischen Normen erfüllen, um diese für den rechnerischen Nachweis der Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nach Eurocode 5 (EC 5) [12] anwenden zu dürfen. Im Vergleich dazu wird in Südafrika die Bemessung von Holzkonstruktionen im *South African National Standard SANS 10163-1* [13] geregelt. Durch umfassende mechanische Prüfungen an der oben genannten Kiefernholzart und aufbauende Auswertung wird in dieser Masterarbeit das Potential von *Pinus patula* für die Verwendung als Bauholz in Tansania analysiert. In naher Zukunft soll diese Holzart im tansanischen Ingenieurholzbau in Holztafelwänden und als Brettstapeldecken eingesetzt werden. Außerdem sollen erste Hinweise für das Potential zur BSH-Herstellung aufgezeigt werden. Ein langfristiges Ziel weiterer Untersuchungen ist, die Produktion von BSP und anderen Holzwerkstoffen in Tansania zu ermöglichen.

Für alle Festigkeitsuntersuchungen werden die europäischen (EN) beziehungsweise deutschen Normen (DIN) herangezogen. Außerdem werden alle Untersuchungen vor dem Hintergrund einer möglichst unmittelbaren praktischen Anwendung in Tansania durchgeführt. Da in Tansania zunächst nur visuell nach der Festigkeit sortiert werden soll, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Durchführung und Anpassung der visuellen Sortierung und deren Kriterien. Für die langfristig angestrebte maschinelle Sortierung in Tansania müssen neben dieser Arbeit noch weitere Untersuchungen an verschiedenen Querschnitten von tansanischem Kiefernholz unterschiedlicher Herkunftsgebiete durchgeführt werden.

In Vorversuchen wurde bereits festgestellt, dass die aktuellen Sortierkriterien wie sie in DIN 4074-1 [6] zu finden sind zu einem sehr hohen Ausschuss bei der Sortierung von *Pinus patula* führten. Grund hierfür sind vor allem zu breite Jahrringe der tansanischen Kiefernholzart. Deshalb ist auch eine Anpassung der Sortierkriterien nötig. Da sich die Jahrringbreite als Sortierkriterium für tansanisches Kiefernholz voraussichtlich nicht eignet, wird im Rahmen dieser Arbeit die Dichte, wie es bereits bei der tansanischen Sortiernorm TZS 387 [14] (*Tanzania Standard*) üblich ist, als alternatives Beurteilungskriterium herangezogen.

Sowohl durch mein Interesse an der Umsetzung der Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (UN), als auch an den unterschiedlichen Prüfarbeiten im Labor, hat dieses Forschungsthema für mich einen hohen persönlichen Stellenwert. Als Ziele der UN sind in diesem Zusammenhang vor allem die nachhaltige Entwicklung von Städten und Gemeinden sowie von Konsum und Produktion zu nennen [15]. Auch Maßnahmen zum Klimaschutz sind durch die ressourcenschonende Bauweise aus Holz von Bedeutung [15]. Außerdem sehe ich großes Potential in der Entwicklung der tansanischen Holzbaubranche und will mit meinem persönlichen Engagement zur Festigkeitsermittlung von tansanischem Kiefernholz beitragen.

1.2 Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit

Die zentrale Forschungsfrage dieser Masterarbeit lautet aufgrund der in Kapitel 1.1 beschriebenen Ausgangslage und Forschungsthematik wie folgt:

„Wie ist das Potential der tansanischen Kiefer (*Pinus patula*) für die Verwendung zu tragenden Zwecken in Tansania?“

Das Hauptziel dieser Masterarbeit ist daher die Ermittlung der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften, sowohl für die Zuordnung in die Zugfestigkeitsklassen als auch Biegefestigkeitsklassen der EN 338 [4]. Diese sind: Biege- oder Zugfestigkeit, Biege- oder Zug-Elastizitätsmodul (E-Modul) in Faserrichtung und Rohdichte. Hierzu soll das Potential unterschiedlicher Sortierverfahren zur Einteilung des Schnittholzes in die Festigkeitsklassen der EN 338 [4] untersucht, analysiert und optimiert werden.

Basis hierzu liefert sowohl die Aufnahme zerstörungsfreier sichtbarer und nicht sichtbarer Parameter als auch die Ermittlung mechanischer Kennwerte nach EN 408 [3]. Im Vordergrund der Untersuchungen steht die direkte praktische Anwendbarkeit in Tansania, wodurch der Fokus primär auf der visuellen Sortiermethode liegt. Für die maschinelle Sortierung soll zudem eine Grundlage für weitere Arbeiten geschaffen werden.

Im Einzelnen sollen durch diese Masterarbeit folgende, nachgeordnete Forschungsfragen in Form von weiteren Forschungszielen beantwortet werden:

- Wie ist das Potential, ausgedrückt in Ausbeute und charakteristischen Werten der mechanischen Eigenschaften, unterschiedlicher maschineller und visueller Sortierverfahren für die Klassifizierung der tansanischen Kiefernholzart *Pinus patula*?
- Inwieweit lässt sich das Potential der visuellen Sortierung nach Tragfähigkeit durch Anpassung der Sortierregeln beziehungsweise -kriterien erhöhen? Ist dabei eine Einführung von zusätzlichen Festigkeitsklassen sinnvoll?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Zug- und Biegefestigkeit bei der tansanischen Kiefernholzart *Pinus patula*?
- Wie ist das Verhältnis der charakteristischen Werte von festigkeitsklassenbestimmenden Merkmalen gegenüber den Werten aus dem europäischen System der Festigkeitsklassen?
- Wie stehen die charakteristischen Werte der festigkeitsklassenbestimmenden Merkmale der tansanischen Kiefernholzart *Pinus patula* im Verhältnis zu den Werten der europäischen Kiefernholzart *Pinus sylvestris*?
- Wie sind die mechanischen Eigenschaften der keilgezinkten tansanischen Kiefer einzustufen? Wie ist dabei die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindungen zu beurteilen?

Aus den offenen Forschungsfragen zu den mechanischen Kennwerten der tansanischen Kiefernholzart *Pinus patula* und dem Ziel dieser Masterarbeit leitet sich folgender methodischer Ansatz ab:

Im folgenden Kapitel wird zunächst der theoretische Hintergrund der Arbeit erläutert. In Kapitel 3 wird das verwendete Material vorgestellt und die angewandte Methode zur Beantwortung der Forschungsfragen beschrieben. Kapitel 4 enthält die Ergebnisse aus den zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfmethoden. In den Kapiteln 5 und 6 werden unterschiedliche Sortierverfahren herangezogen, um das untersuchte tansanische Kiefernholz in die verschiedenen Zug- und Biegefestigkeitsklassen nach EN 338 [4] einordnen zu können. Ein Vergleich der Festigkeitsprofile auf Basis der zerstörenden Zug- und Biegeprüfungen wird in Kapitel 7 angestellt. Die Diskussion der unterschiedlichen Prüf- und Sortierergebnisse erfolgt in Kapitel 8. Hier werden unter anderem auch die oben genannten Forschungsfragen beantwortet. Zum Schluss der Arbeit werden in Kapitel 9 die wichtigsten Ergebnisse beziehungsweise Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Forschungsarbeiten aufgezeigt.

2 Theoretischer Hintergrund der Arbeit

2.1 Grundlagen der Festigkeitssortierung von Nadelholz

Die Sicherheit einer Holzkonstruktion hängt nach Ravenshorst [16] von einer Reihe von Aspekten ab, wie zum Beispiel der korrekten mechanischen Modellierung der Lasten, einer guten Vorhersage des strukturellen Verhaltens des verwendeten Materials, der Verbindungen und einer guten Verarbeitung während der Ausführung. Diese Masterarbeit beschränkt sich auf die genaue Bestimmung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften sowie der Rohdichte von Holz, welches in Bauwerken verwendet werden soll.

Im Allgemeinen streuen die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von unsortiertem Schnittholz in weiten Bereichen [17]. Hierfür gibt es nach Blaß et al. [18] zwei maßgebliche Ursachen. Einerseits handelt es sich bei Stammholz um einen anisotropen natürlichen Rohstoff, dessen mechanische und physikalische Eigenschaften natürlichen Schwankungen unterliegen. Andererseits beeinflussen festigkeitsbestimmende Merkmale wie Ästigkeit oder Faserneigung die individuelle Leistungsfähigkeit eines Schnittholzes, durch die vielfältigen Einschnittmöglichkeiten während der Herstellung, unterschiedlich stark. Um Schnittholz in Europa als Bauholz für tragende Zwecke verwenden zu dürfen, ist nach EC 5 [12] eine angemessene Klassifizierung in verschiedene Festigkeitsklassen erforderlich. Innerhalb dieser Festigkeitsklassen werden nach EN 338 [4] insbesondere charakteristische Festigkeitswerte definiert. Basierend auf diesen charakteristischen Festigkeiten kann der Bemessungswiderstand eines Bauteils bei der Tragwerksplanung bestimmt werden [18].

Nach Ravenshorst [16] umfasst der Begriff Festigkeitssortierung die Einteilung von Schnittholz in Gruppen, denen die gleichen Festigkeitseigenschaften zugeordnet werden können. E. Gehri [19] definiert den Begriff Festigkeitssortierung folgendermaßen: Sortieren ist „*ein Aufteilen der ursprünglichen Menge in Teilmengen und damit Homogenisieren von (mechanischen und physikalischen) Eigenschaften nach definierten Gütekriterien und / oder Dimensionen*“.

Die Festigkeitssortierung von Schnittholz erfolgt im Allgemeinen auf Grundlage von Parametern, sogenannten sichtbaren und nicht sichtbaren Sortierparametern, die im Zusammenhang mit den Festigkeitseigenschaften stehen [16], [20]. Durch die Festlegung verschiedener Grenzwerte für sichtbare Sortierparameter, können einzelne Schnitthölzer in verschiedenen Sortierklassen mit unterschiedlichen Werten der Festigkeitseigenschaften eingeteilt werden. Werden hingegen Grenzwerte für nicht sichtbare Sortierparameter im Rahmen einer maschinellen Sortierung definiert, können die Schnitthölzer direkt in eine Festigkeitsklasse eingeordnet werden. Die Auswirkung der Festigkeitssortierung auf eine unsortierte Grundgesamtheit wird im Folgenden durch die Erkenntnisse aus der Arbeit von Ravenshorst [16] erläutert. In Abbildung 2-1 ist die Festigkeitsverteilung einer unsortierten Grundgesamtheit (obere Linie) zu sehen. In der Abbildung werden die Schnitthölzer der unsortierten Grundgesamtheit beispielhaft in drei Sortierklassen (a), (b) und (c) eingeteilt. Die 5%-Quantile der Sortierklassen sind durch vertikale gestrichelte Linien gekennzeichnet.

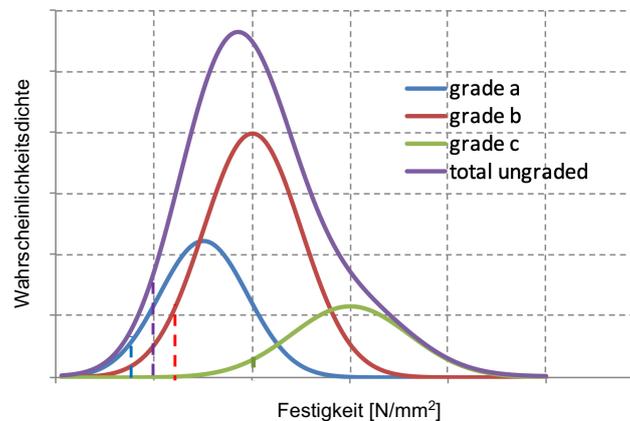


Abbildung 2-1: Auswirkung der Festigkeitssortierung [16]

Wie die Abbildung zeigt, hat die Sortierung in diesem Fall zwei Auswirkungen: Die 5%-Quantile der Sortierklassen (b) und (c) sind höher als die 5%-Quantile der nicht sortierten Grundgesamtheit [16]. Des Weiteren ist die Varianz der Festigkeitseigenschaften der drei Sortierklassen im Vergleich zur unsortierten Grundgesamtheit als geringer anzusehen [16]. Dies führt im Allgemeinen zu einer wirtschaftlicheren Nutzung des Holzes.

Zur Bestimmung des 5%-Quantils einer Verteilung muss zunächst der Verteilungstyp (Normal-, Log-Normal-, Weibull-Verteilung) parametrisch oder nicht parametrisch bestimmt werden. Die gewählte Verteilungsart hat hierbei Auswirkungen auf das Ergebnis der Einstufung. Nach Ravenhorst [16] liegt es daher nahe, für jeden neuen Datensatz die am besten passende Verteilungsart zu ermitteln. In Normen und zahlreichen Forschungsarbeiten wird jedoch oft eine Verteilungsart für eine bestimmte mechanische Eigenschaft empfohlen (siehe Kapitel 3.3).

Um die „Leistungsfähigkeit“ einer Sortierung bewerten zu können, wurden folgende drei grundlegende Kriterien von Augustin [19] eingeführt: Trennschärfe, Aufwand und Ausbeute. Die Trennschärfe beschreibt hierbei das möglichst sichere Einordnen in eine Sortierklasse bei einem gegebenen Grenzwert. Der Aufwand wird durch die pro Schnittholz aufzuwendende Zeit und durch die Anzahl der zu berücksichtigenden Sortiermerkmale definiert. Ein Maß zur Wirtschaftlichkeit einer Sortierung ist die Ausbeute. Sie berechnet sich aus dem Quotienten der Schnitthölzer einer Sortierklasse zu jenen der Grundgesamtheit. Je geringer der Ausschuss beziehungsweise je höher der Anteil an Schnitthölzern in höheren Sortierklassen ist, desto besser kann ein Sortierergebnis aus ökonomischer Sicht angesehen werden.

Direkte und indirekte Sortierung

Nach Augustin [19] hat die Festigkeitssortierung von Schnittholz besondere Herausforderungen, da die festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften nicht direkt bestimmbar sind. Diese Eigenschaften können nur durch zerstörende Prüfverfahren, wie beispielsweise den in EN 408 [3] aufgeführten Prüfverfahren, ermittelt werden. Folglich ist es erforderlich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften durch zerstörungsfreie Prüfmethode, also auf indirekte Weise, vorherzusagen [19]. Diesbezüglich wird das Schema der direkten und indirekten Sortierung in Abbildung 2-2 dargestellt.

Bei der direkten Sortierung wird die Zielgröße – festigkeitsklassenbestimmende Eigenschaft – direkt aus der Messgröße bestimmt. Bei der indirekten Sortierung erfolgt die Bestimmung der Zielgröße stattdessen beispielsweise durch die Anwendung eines linearen Korrelationsmodells zwischen einer zerstörungsfrei erfassten Messgröße und der Zielgröße.

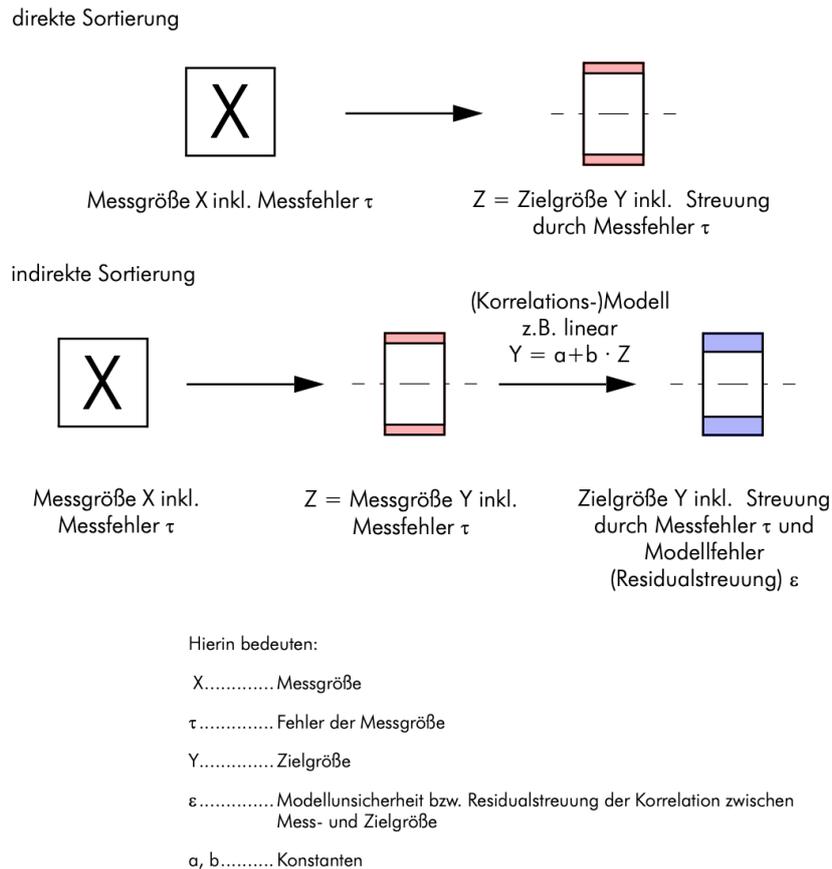


Abbildung 2-2: Schema der direkten und indirekten Sortierung [19]

Das Schema veranschaulicht den Nachteil der indirekten Sortierung gegenüber der direkten Sortierung. Die indirekte Sortierung weist laut Augustin [19] eine gewisse Unschärfe hinsichtlich der Bestimmung der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften gegenüber der direkten Sortierung auf. Diese Unschärfen nehmen zu, je indirekter die Messung erfolgt, da sich die Ungenauigkeiten der einzelnen Messungen kumulativ addieren [19].

Neben den oben genannten Messfehlern und Modellunsicherheiten beeinflussen auch die anisotropen Eigenschaften von Holz das Sortierergebnis einer unsortierten Grundgesamtheit. Diesbezüglich fasste Augustin [19] die Bestimmtheitsmaße auf Grundlage des Korrelationskoeffizienten nach Pearson für verschiedene Sortierzielgrößen und Methoden (siehe Tabelle 2-1) mehrerer Studien zusammen.

Tabelle 2-1: Korrelationsanalyse zwischen Festigkeiten und Sortierparametern für Fichtenholz, eine Zusammenstellung der Bestimmtheitsmaße R^2 aus verschiedenen Studien [19]

Zerstörungsfrei messbarer Parameter	Bestimmtheitsmaß R^2						
	Biegefestigkeit			Zugfestigkeit			
Äste	0,27	0,20	0,16	0,25	0,36	0,42	0,30
Mittlere Jahrringbreite (JRB)	0,21	0,27	0,20	0,44	0,36	0,33	0,28
Rohdichte	0,16	0,30	0,16	0,40	0,38	0,29	0,38
Dyn. E-Modul	0,72	0,53	0,55	0,56	0,70	0,69	0,58
Äste und mittlere JRB	0,37	0,42	0,39	-	0,49	-	-
Äste und Rohdichte	0,38	-	0,38	-	0,55	0,61	0,64
Äste und dyn. E-Modul	0,73	0,58	0,64	-	0,70	0,76	0,78

Wie die Tabelle veranschaulicht, ist es möglich, für die Sortierung von Schnittholz mehrere Sortierparameter, also Messgrößen, zu kombinieren. Dadurch können aus einer Vielzahl von Messgrößen durch Modellbildung mehrdimensionale (stochastische) Modelle abgeleitet werden, um die Zielgröße zu bestimmen. Nach Augustin [19] ist jedoch eine Erhöhung der Anzahl an zu berücksichtigenden Sortierparametern nur bis zu einer Kombination aus maximal drei unterschiedlichen Parametern wirtschaftlich sinnvoll.

Sortiermethoden von Schnittholz nach der Festigkeit

Visuelle Sortierung

Die visuelle Sortierung von Schnittholz für tragende Zwecke erfolgt auf der Grundlage nationaler Normen [21] und wird bereits seit Jahrhunderten praktiziert [17]. Nach Blaß et al. [18] ist die visuelle Sortierung ein einfaches Mittel zur Festigkeitssortierung von Schnittholz. Dabei werden ausschließlich Merkmale verwendet, die visuell erkennbar und erfassbar sind [18]. Diese werden von einem dafür geschulten Fachpersonal direkt am Schnittholz erfasst [6]. Nach Stapel [20] beruht das Sortierprinzip darauf, dass es eine Korrelation zwischen der Ausprägung eines visuell erfassbaren Sortiermerkmals des Schnittholzes, wie zum Beispiel der Astgröße, und den mechanischen Kenngrößen gibt. Durch Versuche an bauteilgroßen Schnitthölzern und umfangreichen Erfahrungswerten wurden Grenzwerte für diese Merkmale festgelegt, wie beispielsweise in der deutschen Sortiernorm DIN 4074-1 [6]. Anhand dieser Grenzwerte erfolgt, wie bereits oben beschrieben, die Einteilung in sogenannte Sortierklassen. In Deutschland werden dabei die visuellen Sortierklassen S7, S10 und S13 verwendet. Bei der visuellen Sortierung von Nadelschnittholz nach der Festigkeit werden in der oben genannten Norm im Wesentlichen folgende Sortiermerkmale berücksichtigt:

- Äste
- Faserneigung
- Markröhre
- Jahrringbreite, usw.

Zusätzlich zu den oben genannten Sortiermerkmalen werden auch Imperfektionen der Schnitthölzer bei der visuellen Sortierung berücksichtigt, die keine Auswirkung auf die Tragfähigkeit eines Holzstückes haben. Diesbezüglich sind zum Beispiel die Sortiermerkmale Baumkante und Verfärbung aus DIN 4074-1 [6] zu nennen. Durch die Berechnung der charakteristischen Werte der Sortierklassen erfolgt anschließend die Zuordnung in die Festigkeitsklassen nach EN 338 [4].

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der visuellen Sortiermethode nach Augustin [19] und Ravenhorst [16] zusammengefasst. Als Vorteile der visuellen Sortierung können demnach folgende Aspekte genannt werden:

- Die Sortiermethode kann als recht kostengünstig angesehen werden, da sie ohne weitere Messinstrumente oder apparative Hilfsmittel durchgeführt werden kann [19].
- Grundsätzlich umfassen die Sortiervorschriften relativ einfach zu erlernende und anwendbare Regeln [16].
- Mit einer sorgfältigen Sortierung können im Verhältnis zum Aufwand gute Sortierergebnisse erzielt werden. Dies bedeutet, dass eine ausreichende Trennschärfe bei den Klassenzuordnungen gewährleistet wird [16].

Als Grenzen der visuellen Sortierung können nach Augustin [19] und Blaß et al. [18] folgende Punkte aufgezählt werden:

- Da die Ergebnisse der Sortierung aufgrund der relativ monotonen Vorgehensweise stark von der Aufmerksamkeit und Konzentration des Sortierers abhängig sind [19], ist die Leistungsfähigkeit der visuellen Sortierung als begrenzt zu betrachten [18].
- Die Sortierung nach visuell erfassbaren Merkmalen ist nur bedingt reproduzierbar, da die Einordnung in eine Sortierklasse auf einer subjektiven Entscheidung des Sortierpersonals beruht [19].
- Die einfachen Sortierregeln ermöglichen es nicht, alle Einflüsse und Korrelationen der Sortierparameter zu berücksichtigen [18]. Dadurch kann es zu einer sogenannten Negativsortierung kommen, bei der die Klassifizierung durch den schlechtesten Sortierparameter bestimmt wird [19].
- Höherwertige Schnittholzsortimente können nicht ausreichend sicher durch eine visuelle Sortierung klassifiziert werden, wodurch das volle Potential des Schnittholzes nicht vollständig ausgeschöpft werden kann [18].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine visuelle Sortierung von Schnittholz mit höherer Tragfähigkeit nur begrenzt durchführbar ist. Um die Leistungsfähigkeit der visuellen Sortierung zu verbessern, kann sie nach Blaß et al. [18] durch einen maschinell ermittelten Sortierparameter ergänzt werden.

Maschinelle Sortierung

Die maschinelle Schnittholzsortierung hat ihren Ursprung in den USA und Australien [17]. Erst in den späten 1970er Jahren etablierte sie sich auch in Europa [17]. Im Gegensatz zur visuellen Sortierung wird die maschinelle Sortierung von Schnittholz in europäischen Normen, wie EN 14081-2 [5] und EN 14081-3 [22], geregelt. Außerdem werden hier die Schnitthölzer direkt in eine Festigkeitsklasse sortiert und nicht wie bei der visuellen Sortierung zuerst in eine Sortierklasse [20]. Bei der maschinellen Sortierung werden grundsätzlich Merkmale und Eigenschaften der Holzstruktur ermittelt, die augenscheinlich nicht erkennbar sind [17]. Diese Eigenschaften werden dabei mithilfe einer Sortiermaschine objektiv erfasst und zerstörungsfrei bestimmt [18]. Nach den Erkenntnissen zahlreicher Forschungen ist diesbezüglich der dynamische E-Modul, als wichtigstes indirektes Sortiermerkmal, sowie die Rohdichte zu nennen. Aufgrund der hohen Korrelation des dynamischen E-Moduls mit den festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften im Vergleich zu anderen Sortierparametern (siehe Tabelle 2-1) stellt er einen geeigneten Sortierparameter von Schnittholz unterschiedlicher Holzarten dar [19]. Nach Stapel et al. [17] weisen maschinelle Sortierverfahren demnach in der Regel höhere Vorhersagegenauigkeiten auf als visuelle Sortierverfahren.

Die ersten Sortiermaschinen bestimmten die Steifigkeit über die Durchbiegung [23]. Bei diesem Verfahren wird der dynamische E-Modul anhand der Durchbiegung w unter einer konstanten Last F und gegebenen Querschnittsabmessungen berechnet [24]. Dieses Verfahren wird in überarbeiteter Form weltweit noch immer in zahlreichen Betrieben eingesetzt [20]. Moderne Sortiermaschinen sagen die Holzeigenschaften dagegen durch Eigenfrequenz- beziehungsweise Durchstrahlungsmessungen voraus [20]. Bei der Eigenfrequenzmessung wird das Schnittholz durch einen Impuls am Lamellenende in eine freie Längsschwingung versetzt und anschließend die Eigenfrequenz gemessen. Anhand der gemessenen Eigenfrequenz und der vorab ermittelten Rohdichte, kann der dynamische E-Modul berechnet werden [24]. Bei der Sortierung auf Grundlage der Durchstrahlung, wird die Zeit eines ausgestrahlten Impulses, wie zum Beispiel Röntgen- oder Ultraschallstrahlen, gemessen. Anhand der berechneten Durchstrahlungsgeschwindigkeit von einem Schnittholze zu dem Anderen, kann anschließend auf die Rohdichte, sowie auf den dynamischen E-Modul des Schnittholzes geschlossen werden [24].

Die Arbeit von Ranta-Maunus et al. [25], in der insgesamt sechs unterschiedliche Sortiermaschinen für die Festigkeitssortierung von europäischem Nadelholz untersucht wurden, zeigte, dass die höchste Vorhersagequalität mit einer Multisensormaschine erreicht werden kann. Diese Sortiermaschine maß sowohl die Dichte, als auch die Eigenfrequenz und die Äste mittels Röntgenstrahlen. Dank solcher Sortiermaschinen stehen der Holzverarbeitenden Industrie Hilfsmittel zur Verfügung, die es ermöglichen Schnittholz mit besonders hoher Tragfähigkeit effizient zu nutzen [18]. Mit diesen Maschinen ist es möglich, Schnittholz bis zur Festigkeitsklasse C40 nach EN 338 [4] zu sortieren [18].

Die Grundlage der maschinellen Sortierung nach EN 14081-2 [5] bilden sogenannte kennzeichnende Eigenschaften (IP), die durch Messung oder einer Kombination von Messungen direkt von der Sortiermaschine berechnet werden. Diese IPs werden für die Vorherhersage der festigkeitsklas-

senbestimmenden Eigenschaften verwendet. Außerdem beruhen hierauf die Einstellungen der Sortiermaschine. EN 14081-2 [5] sieht zunächst eine optimale Sortierung in ausgewählte Festigkeitsklassenkombinationen vor. Die optimale Sortierung basiert dabei auf den mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Holzes, die durch zerstörende Prüfungen nach EN 408 [3] ermittelt wurden. Durch Festlegung von Grenzwerten für die *IPs*, werden die Schnitthölzer in eine temporäre Klassenkombination eingeteilt. Die Zuordnung einer temporären Klasse in die gewünschte Festigkeitsklasse nach EN 338 [4] erfolgt erst, wenn die charakteristischen Werte der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften die erforderlichen Grenzwerte aus EN 338 [4] erfüllen. Die finalen Maschineneinstellungen beschreiben somit die optimierten Grenzwerte der *IPs* für eine bestimmte Festigkeitsklassenkombination.

In den folgenden Abschnitten werden die Vor- und Nachteile bezüglich der maschinellen Sortierung aus den Erkenntnissen von Augustin [19], Stapel [20] und Stapel et al. [17] zusammengefasst. Für die Vorteile der maschinellen Sortierung nennen die Autoren folgende Aspekte:

- Die Sortiergeschwindigkeit der maschinellen Sortierung gegenüber der visuellen Sortierung ist um einiges höher [17]. Mit einer Leistungsfähigkeit von bis zu 300 lfm/min [19] einer Sortiermaschine können Schnitthölzer im Vergleich zur visuellen Sortierung schneller einer Festigkeitsklasse zugeordnet werden.
- Durch die höhere Genauigkeit bei der Zuordnung zu den einzelnen Festigkeitsklassen [17] ergibt sich ein geringerer Variationskoeffizient innerhalb der Klassen und somit eine höhere Homogenität. Dies führt zu einer höheren Zuverlässigkeit der maschinellen Sortierung gegenüber der visuellen Sortierung [20]
- Die kennzeichnenden Eigenschaften (*IP*) werden von der Sortiermaschine objektiv erfasst [17] und sind nicht wie bei der visuellen Sortierung vom subjektiven Empfinden des Sortierers abhängig.
- Durch die maschinelle Sortierung lässt sich das Potential des Holzes sowohl wirtschaftlich, durch Erhöhung der Ausbeute, als auch qualitativ, durch bessere Ausnutzung der Festigkeitseigenschaften, optimiert nutzen [17]. Dies bedeutet, dass auch die hochwertigeren Sortierklassen im Vergleich zur visuellen Sortierung erreicht werden können, wodurch sich auch die Ausbeuten in Richtung dieser höherwertigen Klassen verlagern [19].

Die Grenzen der maschinellen Sortierung sind nach Augustin [19] und Stapel et al. [17]:

- Die Verwendung von Sortiermaschinen ist mit einem hohen Zulassungs- und Wartungsaufwand verbunden [19].
- Aufgrund der beträchtlichen Investitionskosten sind solche Maschinen nicht für alle Unternehmen der Holzindustrie wirtschaftlich tragbar [19]. Die hohen Anschaffungskosten entstehen hauptsächlich durch die Komponenten der Maschinen, die für Durchstrahlung oder Bildverarbeitung benötigt werden [17].

2.2 Zusammenfassung europäischer Normen für die BSH-Herstellung

Da in dieser Arbeit unter anderem das Potential von *Pinus patula* für die BSH-Herstellung aufgezeigt werden soll, werden im Folgenden die wichtigsten europäischen Normen diesbezüglich zusammenfassend dargestellt.

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, muss Schnittholz zur Verwendung für tragende Zwecke in Europa nach seiner Festigkeit sortiert sein. Anhand der sortierten Schnitthölzer erfolgt dann die Herstellung von BSH. Die unterschiedlichen Festigkeitsklassen und deren erforderlichen charakteristischen Grenzwerte sind dabei in EN 338 [4] definiert. Hier wird zwischen Festigkeitsklassen aufgrund von Hochkantbiegeprüfungen und Zugprüfungen unterschieden, den sogenannten C- und T-Klassen [4]. Die Anforderungen für die Produktion von BSH aus Nadelholz sind in EN 14080 [26] festgelegt. EN 15497 [27] legt dabei die Anforderungen an die Keilzinkenverbindungen der in BSH verwendeten Lamellen fest.

Die Festigkeitssortierung von Schnittholz für die BSH-Herstellung muss dabei nach den Anforderungen aus EN 14081-1 [28] durchgeführt werden. Dabei kann das Schnittholz visuell als auch maschinell sortiert werden [28]. Die Regeln für die visuelle Sortierung sind in Europa national geregelt. Die visuelle Sortiernorm für Nadelhölzer in Deutschland ist DIN 4074-1 [6]. EN 1912 [29] bietet die Möglichkeit die visuellen Sortierklassen direkt in die Festigkeitsklassen von EN 338 [4] einzuordnen. Die Einordnung in die Festigkeitsklassen erfolgt dabei in Abhängigkeit von der verwendeten nationalen Norm für die visuelle Sortierung, der erreichten visuellen Sortierklasse, der Holzart und der Herkunft [29]. Ist die Holzart oder die Herkunft nicht in EN 1912 [29] aufgeführt, wie es beispielsweise bei *Pinus patula* der Fall ist, ist es möglich, die festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften aus EN 384 [30] durch zerstörende Prüfung nach den in EN 408 [3] festgelegten Anforderungen zu ermitteln. Für die Zuordnung von nicht zertifizierten Holzarten in die Festigkeitsklassen ist laut EN 384 [30] die Bestimmung von drei Materialeigenschaften erforderlich. Durch die Ermittlung der charakteristischen Werte der Zug- oder Biegefestigkeit, des Zug- oder Biege-E-Moduls und der Rohdichte kann eine eindeutige Zuordnung in die unterschiedlichen Festigkeitsklassen erfolgen [30]. Anschließend kann die Holzart durch einen akzeptierten Sortierbericht (AGR) mit ihrer Herkunft und visuellen Sortierklasse in die Liste der EN 1912 [29] für die Zuordnung zu einer Festigkeitsklasse aufgenommen werden [29]. Die Einstellungen für die maschinelle Sortierung sind in EN 14081-2 [5] festgelegt. Für die Herleitung der Maschineneinstellungen können dabei unterschiedliche Maschinensysteme mit sogenannten *IPs*, berechnet werden [5].

Bei den Festigkeitsklassen für BSH aus Nadelholz wird gemäß EN 14080 [26] zwischen kombiniertem und homogenem Brettschichtholz unterschieden. Die Festigkeitsklasse GLc beschreibt dabei kombiniertes und die Festigkeitsklasse GLh homogenes Brettschichtholz [26]. Nach Colling [24] sind die in der freien Wirtschaft gängigsten BSH-Festigkeitsklassen GL24, GL28, GL30 sowie GL32. Das komplette Sortiment an BSH-Festigkeitsklassen wird in der oben erwähnten Norm [26] dargestellt. Die Festigkeitsklassen reichen hier von GL20 bis GL32 [26].

2.3 Stand des Wissens zu Kiefernholz

Um den aktuellen Stand der Forschung zu tansanischem Kiefernholz (*Pinus patula*) besser verstehen und einordnen zu können, wird zunächst der allgemeine Wissenstand zur Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), einer der am häufigsten angebauten Kiefernholzarten in Europa [31], genauer erläutert. Daran anschließend wird der Kenntnisstand über Kiefernholz aus Afrika, speziell Tansania, aufgeführt.

2.3.1 Europäisches Kiefernholz

Für die Stellungnahme zum aktuellen Stand des Wissens zu Kiefernholz in Europa sind die Forschungsergebnisse aus mehreren Studien zusammenfassend in Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3 dargestellt. Sie umfassen Ergebnisse von zerstörenden Zug- und Biegeprüfungen der Kiefernart *Pinus sylvestris* aus unterschiedlichen europäischen Herkunftsländern. Die Herkunftsländer werden dabei nach den üblichen Ländercodes der ISO-3166 Klassifikation [32] in den Tabellen abgekürzt. Außerdem wird sich auf die Darstellung der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit und Rohdichte in den Tabellen beschränkt. Die Tabellen geben im Allgemeinen Auskunft über die Mittelwerte, 5%-Quantile sowie die Variationskoeffizienten (VK) der jeweiligen Eigenschaften. In der letzten Zeile der Tabellen sind jeweils die gemittelten Werte aller Forschungsergebnisse angegeben.

Eine umfassende Analyse der oben genannten Kiefernholzart wurde durch das Gradewood Forschungsprojekt von Ranta-Maunus et al. [25] durchgeführt. Hier wurden die festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften von Prüfkörpern aus mehreren europäischen Herkunftsländern ermittelt. Die untersuchten Prüfkörper stammten dabei aus unterschiedlichen Regionen der Länder Finnland, Frankreich, Polen, Russland und Schweden. Bei den aus Frankreich stammenden Prüfkörpern wurde die Prüfung dabei getrennt für Anbauregionen unter und über 600 m ü. NN. durchgeführt. Die unterschiedlichen Regionen der oben genannten Länder werden im Folgenden aufgezählt:

- Polen: Murow, Swietjano
- Schweden: Gästrikland, Lapland, Västerbotten und Västergötland
- Finnland: Ost-Finnland und West-Finnland
- Russland: Novgorod und Vologda

Zum Vergleich der Forschungsergebnisse aus Finnland und Russland sind ergänzend die Prüfergebnisse der Arbeit von Hautamäki et al. [33] in den Tabellen mit aufgeführt. In dieser Arbeit wurden die festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften von *Pinus sylvestris* an Prüfkörpern aus denselben Regionen Finnlands und Russlands untersucht, wie bei Ranta-Maunus et al. [25]. Zusätzlich dazu wurden auch Versuche an Prüfkörpern aus Südost-Finnland durchgeführt. Die Arbeit von Hautamäki et al. [33] gibt außerdem Auskunft über die Jahrringbreite der untersuchten Prüfkörper. So lag die mittlere Jahrringbreite zwischen 1,9 mm für Prüfkörper aus Vologda und 1,3 mm für Prüfkörper aus Nord-Finnland.

In der Arbeit von Konofalska et al. [34] wurden zerstörende Prüfungen an der oben genannten Kiefernholzart aus verschiedenen Anbauregionen Polens durchgeführt. Dabei wurden andere Anbauregionen als bei Ranta-Maunus et al. [25] untersucht. Die Prüfkörper stammten dabei aus insgesamt 7 unterschiedlichen Versuchsflächen der forstlichen Versuchsanstalt in Rogów. Diese werden im Folgenden aufgezählt: Lipowa, Dłużek, Ruciane, Jegiel, Rychtal, Supraśl und Nowy Targ. Außerdem untersuchten Burawska et al. [35] Prüfkörper aus den selsischen Forstwirtschaftsgebieten. Diese Arbeit analysierte neben den festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften auch die mittlere Jahrringbreite der Prüfkörper. Die mittlere Jahrringbreite der Grundgesamtheit lag demnach bei 1,84 mm [35]. Die minimale Jahrringbreite wurde mit 0,60 mm und die maximale Jahrringbreite mit 3,90 mm erfasst [35].

Da die bereits erwähnten Forschungen keine Versuche an *Pinus sylvestris* aus dem Vereinigten Königreich beziehungsweise der Republik Irland durchgeführt haben, werden in den Tabellen diesbezüglich die Arbeiten von Ridley-Ellis et al. [36] und Gil-Moreno et al. [37] erwähnt. In diesen Arbeiten wird jedoch keine nähere Auskunft über die Anbauregion der Prüfkörper gegeben. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse dieser Arbeiten unter der nationalen Region Großbritannien zusammengefasst.

Weitere Forschungen an spanischem Kiefernholz wurden von Prieto et al. [38] durchgeführt. Die untersuchten Prüfkörper wurden dabei den vier wichtigsten Verbreitungsregionen der Kiefernholzart in Spanien entnommen. Dies sind die Pyrenäen, sowie die iberischen, zentralen und penibetische Wachstumsregionen.

Zusammenfassung: Aktueller Stand des Wissens zu europäischem Kiefernholz

Nach Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3 liegt die mittlere Zugfestigkeit für die europäische Kiefernholzart *Pinus sylvestris* bei 25,7 N/mm² und die mittlere Biegefestigkeit bei 42,2 N/mm². Der Mittelwert aus Zug- und Biegesteifigkeit beträgt dagegen ca. 10,5 kN/mm². Die mittlere Rohdichte, aus den Zug- und Biegeprüfungen ergibt sich in den oben genannten Forschungen zu etwa 490 kg/m³ für europäisches Kiefernholz. Die mittlere Jahrringbreite von *Pinus sylvestris* aus Europa beträgt nach Hautamäki et al. [33] und Burawska et al. [35] etwa 2,0 mm.

Wie aus den Variationskoeffizienten (VK) der Tabellen hervorgeht, weisen die unterschiedlichen Festigkeitswerte im Mittel die höchsten Streuungen auf. Die ermittelten Steifigkeitswerte streuen in der Regel etwas weniger als die Festigkeitswerte. Die Rohdichten weisen hingegen die geringste Streuung mit einem mittleren VK von 0,10 auf.

Tabelle 2-2: Zusammenstellung der Forschungsergebnisse zu mechanischen Kennwerten der Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) europäischer Herkunft auf Basis der Zugprüfung in Gebrauchsabmessungen

Land		$f_{t,0}$ N/mm^2			E_t kN/mm^2		ρ_t kg/m^3		
		Mittel	5%- Quantil	VK	Mittel	VK	Mittel	5%- Quantil	VK
FI	[25]	32,1	16,0	0,38	11,4	0,20	491	433	0,10
	[25]	31,0	17,8	0,41	11,3	0,21	493	419	0,12
FR	[25]	17,3	8,3	0,41	8,4	0,25	492	438	0,07
	[25]	23,8	11,0	0,34	9,8	0,22	532	469	0,09
GB	[37]	19,4	8,5	-	8,2	-	507	437	-
PL	[25]	33,6	12,6	0,40	12,5	0,22	556	470	0,10
	[25]	24,3	11,7	0,44	10,7	0,25	510	444	0,10
RUS	[25]	20,6	8,6	0,47	9,8	0,24	445	386	0,11
	[25]	20,3	9,1	0,38	9,5	0,19	439	389	0,08
SE	[25]	27,9	18,1	0,30	10,6	0,15	505	452	0,07
	[25]	23,7	10,7	0,39	8,9	0,19	450	393	0,08
	[25]	26,4	17,5	0,26	8,9	0,18	469	422	0,06
	[25]	33,6	14,7	0,39	11,4	0,21	495	426	0,10
Mittel		25,7	12,7	0,38	10,1	0,21	491	429	0,09

Tabelle 2-3: Zusammenstellung der Forschungsergebnisse zu mechanischen Kennwerten der Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) europäischer Herkunft auf Basis der Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen

Land		f_m N/mm ²			E_m kN/mm ²		ρ_m kg/m ³		
		Mittel	5%- Quantil	VK	Mittel	VK	Mittel	5%- Quantil	VK
ES	[38]	-	27,3	-	11,8	-	-	416	-
	[38]	-	11,8	-	10,1	-	-	405	-
FI	[33]	42,8	-	0,28	11,8	0,21	482	-	0,11
	[33]	43,8	-	0,28	11,8	0,19	492	-	0,12
	[33]	46,6	-	0,30	12,1	0,19	495	-	0,11
GB	[36]	41,0	-	0,30	9,3	0,30	515	-	0,10
	[37]	38,2	17,2	-	9,5	-	521	443	-
PL	[25]	42,0	16,5	0,41	12,4	0,22	539	488	0,10
	[25]	36,5	14,7	0,44	10,9	0,23	493	432	0,09
	[34]	49,5	-	0,31	9,3	0,32	514	-	0,15
	[35]	47,0	-	0,40	12,7	0,27	541	-	0,13
RUS	[33]	31,8	-	0,35	10,0	0,22	440	-	0,10
	[33]	34,0	-	0,33	10,0	0,21	436	-	0,11
SE	[25]	37,8	19,6	0,40	9,1	0,23	458	407	0,10
	[25]	56,4	32,2	0,23	11,8	0,20	500	400	0,10
	[25]	43,5	24,3	0,32	10,9	0,16	482	423	0,09
Mittel		42,2	20,5	0,33	10,8	0,23	493	427	0,11

2.3.2 Afrikanisches Kiefernholz

SANS 10163-1 [13]

SANS 10163-1 [13] ist die zentrale Norm für Bemessung und Konstruktion von Holzbauten in Südafrika. Die Norm regelt den Entwurf, die Herstellung sowie die Montage von Holztragwerken aus Bauholz für tragende Zwecke in Südafrika. Sie ist daher dem EC 5 [12] aus Europa gleichzusetzen. SANS 10163-1 [13] definiert in Anhang N Tabelle N.1 charakteristische Kennwerte von südafrikanischer Kiefer in unterschiedlichen Sortierklassen.

Die in Tabelle 2-4 angegebenen charakteristischen Kennwerte von südafrikanischer Kiefer gelten für visuell und maschinell sortiertes Holz, in den Sortierklassen nach SANS 1783-2 [39] beziehungsweise SANS 1460 [40]. Verglichen mit dem europäischen System der Festigkeitsklassen – EN 338 [4] – werden Festigkeitsklassen von T10 beziehungsweise C14 in den unteren Sortierklassen, bis T18 beziehungsweise C30 in den oberen Sortierklassen erreicht. Die Sortierklasse S5 kann jedoch keiner Festigkeitsklasse zugeordnet werden.

Tabelle 2-4: Charakteristische Kennwerte von südafrikanischer Kiefer nach SANS 10163-1 [13] für Sortierklassen nach SANS 1783-2 [39] und SANS 1460 [40]

Sortier- klasse	$f_{m,k}$ N/mm ²	$f_{t,0,k}$ N/mm ²	$f_{t,90,k}$ N/mm ²	$f_{c,0,k}$ N/mm ²	$f_{c,90,k}$ N/mm ²	$f_{v,k}$ N/mm ²	$E_{0,mean}$ kN/mm ²
S5	11,5	6,7	0,36	18,0	4,7	1,6	7,8
S7	15,8	10,0	0,51	22,8	6,7	2,0	9,6
S10	23,3	13,3	0,73	26,2	9,1	2,9	12,0
S14	32,4	19,1	1,04	35,3	12,9	4,0	16,0

Kiefernholz aus den Regionen Njombe und Iringa (Tansania)

In den folgenden zwei Abschnitten werden die Ergebnisse der Arbeit von Burdzik [41] dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mechanische und physikalische Eigenschaften an Kiefernholz aus den Plantagen des Unternehmens *Tanganyika Wattle Company Ltd.* aus den Regionen Njombe und Iringa, Tansania, untersucht. Es wurden insgesamt zwei Kollektive unterschiedlicher Abmessungen geprüft (siehe Tabelle 2-5). In der Arbeit wird jedoch keine Angabe über die exakte Holzart gemacht. Die Versuchsdurchführung erfolgte in Anlehnung an SANS STM 1122 und den Standard ISO 13910 [42] der Internationalen Organisation für Normung. Die Einteilung in die Festigkeitsklassen nach EN 338 [4] war nicht Teil der Arbeit.

Das Versuchsprogramm umfasste die Bestimmung der charakteristischen Werte der Biege- und Zugfestigkeit, des E-Moduls sowie der Rohdichte der Prüfkörper. Bei der Berechnung der charakteristischen Werte wurde ein Vertrauensniveau von 75% angesetzt. Außerdem wurden die Prüfkörper nach den südafrikanischen visuellen Sortierregeln aus SANS 1783-2 [39] sortiert. Wie aus den Forschungsergebnissen aus Tabelle 2-5 hervorgeht, konnte visuell sortiertes Schnittholz den Festigkeitsklassen T8 beziehungsweise C14 nach EN 338 [4] zugeordnet werden.

Tabelle 2-5: Forschungsergebnisse nach Burdzik [41] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz aus den Regionen Njombe und Iringa (Tansania) auf Basis der Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, Holzart unbekannt

Kollektiv	$f_{m,k}$ N/mm^2	$f_{t,0,k}$ N/mm^2	$E_{0,mean}$ kN/mm^2	ρ_{mean} kN/mm^2
36 x 111	13,1	1,9*	8,8	457
36 x 152	14,5	8,6	8,3	-

* hier erfolgte vorab keine visuelle Sortierung

Kiefernholz von der Sao Hill Plantage (Tansania)

Die folgenden Abschnitte fassen die Ergebnisse der Arbeit von Mwamakimbullah et al. [43] zusammen. Die Einstufung in die Festigkeitsklassen nach EN 338 [4] war nicht Teil der Arbeit. Sie wird hier jedoch mit angeführt, um die Ergebnisse von Mwamakimbullah et al. [43] mit den Ergebnissen dieser Masterarbeit in Kapitel 8 besser vergleichen zu können.

Mwamakimbullah et al. [43] untersuchten die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von insgesamt 110 Schnittholzlamellen aus der *Sao Hill Industries Ltd.* Plantage, Tansania. Davon wurden insgesamt 50 Stück für Biege- und Steifigkeitsprüfungen, 18 Stück für die Zugprüfung und 25 Stück für die Druckprüfung verwendet. Somit wurden knapp 15% des Gesamtkollektivs aufgrund von Qualitätsansprüchen für die Prüfung im Vorfeld aussortiert.

Ziel dieser Arbeit war die Ermittlung von potentiellen Festigkeitsklassen von tansanischem Kiefern-schnittholz. Zu den durchgeführten Festigkeitsprüfungen gehörten insbesondere Biege- sowie Druck- und Zugprüfungen in Faserrichtung. Außerdem wurde die Biegesteifigkeit im Rahmen der Biegeprüfung aus der Verformung, welche mithilfe eines analogen Messschiebers ermittelt wurde, berechnet. Für die Berechnung der charakteristischen Werte wurden die Prüfkörper in die Sortierklassen T18, T24, T30 und T40 gemäß TZS 387 [14] beziehungsweise S5, S7 und S10 gemäß SANS 1783-2 [39] eingeteilt. Anschließend wurden die charakteristischen Werte, siehe Tabelle 2-6, für jede Sortierklasse berechnet.

Aus den Daten der Tabelle 2-6 ist ersichtlich, dass die Ausbeuten in den höheren Sortierklassen auffallend gering waren. Außerdem wiesen die Prüfkörper des Ausschusses nach der TZS-Sortierung bessere charakteristische Werte im Vergleich zur Sortierklasse S5 nach 1783-2 [37] auf. Die Festigkeitsklasse C24 nach EN 338 [4] wurde in den Sortierklassen T18 und S7 erreicht. Diesbezüglich lag die Ausbeute bei der Sortierung nach TZS 387 [14] in der Sortierklasse T18 bei 32% der Grundgesamtheit. Im Gegensatz dazu betrug die Ausbeute bei der Sortierung nach SANS 1783-2 [39] in der Sortierklasse S7 lediglich 12% der Grundgesamtheit. Deshalb kann gesagt werden, dass die Sortierung von tansanischem Kiefernholz nach TZS 387 [14] hinsichtlich Ausbeute und erreichten charakteristischen Werten in der Festigkeitsklasse C24 als am effizientesten angesehen werden kann.

Tabelle 2-6: Forschungsergebnisse nach Mwamakimullah et al. [43] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz (*Pinus patula*) aus der SHI Plantage (Tansania) auf Basis der Zug- und Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, Sortierklassen nach TZS 387 [14] und SANS 1783-2 [39]

Parameter	Kennwert	Gesamtkollektiv	Sortierklassen nach TZS					Sortierklassen nach SANS			
			xxx	T18	T24	T30	T40	xxx	S5	S7	S10
$f_{m,k}$ <i>N/mm²</i>	5%-Quantil	21,8	20,7	25,4	46,1	-	52,7	21,8	20,7	25,4	52,7
	Mittelwert	40,9	34,4	39,8	63,6	-	67,8	35,2	39,9	39,8	72
	Ausbeute	1,00	0,54	0,32	0,10	0,00	0,04	0,44	0,36	0,12	0,08
$E_{m,0,mean}$ <i>kN/mm²</i>	5%-Quantil	6,6	5,7	7,9	9,9	-	19,8	5,7	6,6	7,9	19,8
	Mittelwert	15,3	14,0	13,8	19,2	-	29,7	14,2	13,6	12,2	28,1
	Ausbeute	1,00	0,54	0,32	0,10	0,00	0,04	0,44	0,36	0,12	0,08
$f_{t,0,k}$ <i>N/mm²</i>	5%-Quantil	8,6	8,6	12,5	13,5	-	22,2	10	8,6	13,0	16,0
	Mittelwert	14,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ausbeute	1,00	0,61	0,22	0,11	0,00	0,06	0,22	0,39	0,28	0,11
$f_{c,0,k}$ <i>N/mm²</i>	5%-Quantil	11,2	11,2	13,5	17,9	-	27,3	11,2	13,5	17,5	17,9
	Mittelwert	20,5	21	17,7	18	-	31,2	20,9	18	19,6	26,8
	Ausbeute	25	0,48	0,36	0,88	0,00	0,08	0,36	0,32	0,20	0,12

Kiefernholz aus Mpumalanga (Südafrika)

Prüfungen an der Kiefernholzart *Pinus patula* aus Mpumalanga, Südafrika, wurden von Dowse [44] und Van der Merwe et al. [45] durchgeführt. Im Folgenden werden zuerst die Forschungsergebnisse von Dowse [44] dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse von Van der Merwe et al. [45] zusammengefasst. Auch hier war die Einstufung in die Festigkeitsklassen nach EN 338 [4] nicht Teil der Arbeiten.

Dowse [44] untersuchte die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von insgesamt 1345 Schnittholzlamellen mit zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfmethode. Die Lamellen wurden dabei aus mehreren Standorten entlang des Drakensberg-Gebirges entnommen. Eingangs wurden die Prüfkörper nach SANS 1783-2 [39] visuell sortiert und der dynamische E-Modul über die Eigenfrequenzmessung bestimmt. Die anschließenden zerstörenden Prüfungen wurden nach SANS 6122 [46] durchgeführt, wobei die querschnittsschwächste Stelle in Bezug auf die Position der Lasteinleitung zufällig angeordnet wurde. Bei den zerstörenden Prüfungen wurde die Zug- und Biegefestigkeit sowie der E-Modul bestimmt. Die Ergebnisse der zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfmethode sind in Tabelle 2-7 und Tabelle 2-8 dargestellt.

Die Tabellen zeigen, dass die Prüfkörper des gesamten Biegekollektivs sowie in der Sortierklasse S5 keiner Festigkeitsklasse nach dem europäischen Klassifizierungssystem EN 338 [4] zugeordnet

werden konnten. Erst ab der Sortierklasse S7 war die Zuordnung in die niedrigste Biegefestigkeitsklasse C14 mit einer Ausbeute von 10% möglich. Die Sortierklasse S10 kann mit einer Ausbeute von lediglich 3% der Festigkeitsklasse C16 zugeordnet werden.

Tabelle 2-7: Forschungsergebnisse nach Dowse [44] zu Kennwerten von Kiefernholz (*Pinus patula*) aus Mpumalanga (Südafrika) auf Basis der zerstörungsfreien Prüfmethode

Kennwert	E_{dyn} kN/mm ²	ρ kg/m ³	Jahring- breite mm	Verdre- hung mm	Querkrüm- mung mm	Längskrüm- mung mm
Minimum	4,3	332	1	0	0	0
Maximum	16,9	640	42	45	23	45
Mittelwert	8,7	428	10	2,2	2,6	13,3

Tabelle 2-8: Forschungsergebnisse nach Dowse [44] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz (*Pinus patula*) aus Mpumalanga (Südafrika) auf Basis der Zug- und Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, Sortierklassen nach SANS 1783-2 [39]

Para- meter	Kenn- wert	Gesamt- kollektiv	Sortierklassen nach SANS			
			xxx	S5	S7	S10
$f_{m,k}$ N/mm ²	5%-Quantil	15,1	14,7	14,5	17,8	27,2
	Mittelwert	30,0	28,1	28,8	39,8	49,5
	Ausbeute	1,00	0,51	0,36	0,10	0,03
$E_{m,0,mean}$ kN/mm ²	5%-Quantil	3,5	3,5	3,4	4,2	4,5
	Mittelwert	5,6	5,3	5,4	7,0	7,8
	Ausbeute	1,00	0,51	0,36	0,10	0,03
$f_{t,0,k}$ N/mm ²	5%-Quantil	7,8	6,6	7,2	9,7	11,6
	Mittelwert	12,0	10,9	11,3	16,5	18,4
	Ausbeute	1,00	0,48	0,38	0,11	0,04

Frühere Studien von Erasmus et al. [47] haben ergeben, dass die Holzeigenschaften von *Pinus patula* stark von den Umweltbedingungen abhängen. In Anbetracht dessen untersuchte Van der Merwe et al. [45] die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von *Pinus patula* in Abhängigkeit unterschiedlicher Bodenarten und Höhenlagen. Dafür wurden insgesamt 2690 Prüfkörper aus den Unterregionen *Lowveld* und *Highveld Escarpment* des Drakensberg-Gebirges entnommen. Nach Van der Merwe et al. [45] besteht das *Lowveld Escarpment* größtenteils aus Böden, die aus Sedimentgestein wie Dolomit und Schiefer gebildet wurden. Das *Highveld Escarpment* hingegen besteht größtenteils aus Granitböden. Die Prüfkörper wurden maschinell nach Rohdichte, dynamischem E-Modul und Biegefestigkeit sortiert. Die Forschungsergebnisse hinsichtlich der unterschied-

lichen Anbauregionen und Bodenarten sind in Tabelle 2-9 zu sehen. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Schnittholzlamellen aus Bäumen in Abhängigkeit ihrer Höhenlagen sind in Tabelle 2-10 dargestellt.

Tabelle 2-9: Forschungsergebnisse nach Van der Merwe et al. [45] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz (*Pinus patula*) aus Mpumalanga (Südafrika) auf Basis der Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, in Abhängigkeit der Anbauregion und Bodenart

Anbau-region	Bodenart	f_m <i>N/mm²</i>	E_{dyn} <i>kN/mm²</i>	ρ_{mean} <i>kg/m³</i>
<i>Highveld</i>	Granit	27,5	8,2	411
<i>Lowveld</i>	Dolomit	31,0	9,4	449
<i>Escarpment</i>	Schiefer	30,9	9,4	442

Tabelle 2-10: Forschungsergebnisse nach Van der Merwe et al. [45] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz (*Pinus patula*) aus Mpumalanga (Südafrika) auf Basis der Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, in Abhängigkeit der Höhenlage

Höhenlage m. ü. NN.	f_m <i>N/mm²</i>	E_{dyn} <i>kN/mm²</i>	ρ_{mean} <i>kg/m³</i>
1100 - 1299	28,3	8,4	419
1300 - 1400	31,4	9,7	450
1500 - 1699	30,8	9,3	443
1700 - 1899	29,9	9,1	436

Die Ergebnisse von Van der Merwe et al. [45] bestätigten die Aussage von Erasmus et al. [47] hinsichtlich der geografischen Abhängigkeiten der Holzeigenschaften von *Pinus patula*. Schnitthölzer von Bäumen, die auf *Lowveld* Dolomit und Schiefer gewachsen sind, wiesen höhere mechanische Eigenschaften auf als Schnittholz von Bäumen, die auf *Highveld* Granit gewachsen sind. Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften wurden auch beim Vergleich der jeweiligen Höhenlagen beobachtet. Es gab jedoch keine eindeutige Beziehung zwischen den mechanischen Eigenschaften und der Höhenlage, was möglicherweise auf die regionalen Unterschiede bei den Holzeigenschaften zurückzuführen ist. [45]

Zusammenfassung: Aktueller Stand des Wissens zu afrikanischem Kiefernholz

Aus den Erkenntnissen der oben aufgeführten Arbeiten kann der aktuelle Stand des Wissens zu südafrikanischem und tansanischem Kiefernholz, hinsichtlich der mechanischen Kennwerte aus den zerstörenden Prüfungen der unsortierten Grundgesamtheiten wie folgt zusammengefasst werden:

- Zugfestigkeit f_t
 - > Mittelwerte: zwischen 12,0 N/mm² und 14,3 N/mm²
 - > 5%-Quantile: zwischen 7,8 N/mm² und 8,6 N/mm²

- Biegefestigkeit f_m
 - > Mittelwerte: zwischen 27,5 N/mm² und 40,9 N/mm²
 - > 5%-Quantile: zwischen 13,1 N/mm² und 21,8 N/mm²

- Biege-E-Modul $E_{m,0,mean}$
 - > Mittelwerte: zwischen 5,6 kN/mm² und 15,3 kN/mm²
 - > 5%Quantile: zwischen 3,5 kN/mm² und 8,3 kN/mm²

- Rohdichte ρ
 - > Mittelwerte: zwischen 411 kg/m³ und 457 kg/m³

Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfmethode von Dowse [44] und Van der Merwe et al. [45] zu *Pinus patula* aus Mpumalanga verdeutlichen, dass bei der visuellen Sortierung von afrikanischem Kiefernholz enorme Verdrehungen sowie Quer- und Längskrümmen zu erwarten sind. In der Arbeit von Dowse [44] werden diesbezüglich Maximalwerte von 45 mm für die Verdrehung beziehungsweise Längskrümmung und 23 mm für die Querkrümmung angegeben. Außerdem liegt die mittlere Jahrringbreite in dieser Arbeit bei 10 mm. Im Vergleich dazu wird in Kapitel 2.3.1 eine mittlere Jahrringbreite von rund 2,0 mm für die europäische Kiefernholzart *Pinus sylvestris* ermittelt. Die Mittelwerte hinsichtlich des dynamischen E-Moduls E_{dyn} der beiden Arbeiten liegen je nach Herkunft zwischen 8,2 kN/mm² und 9,7 kN/mm².

3 Material und Methode

3.1 Material

Klimatische Bedingungen in Tansania

Nach Beck et al. [48] variieren die klimatischen Bedingungen in Tansania je nach Region unterschiedlich stark. Wie in Abbildung 3-1 zu erkennen ist, herrscht in den Hochlandgebieten ein gemäßigtes Klima, während an den Küstengebieten ein tropisches Klima mit hoher Luftfeuchtigkeit, hohen Temperaturen und großen Niederschlagsmengen überwiegt [48]. Laut Jones et al. [49] treten zweimal jährlich Regen- und Trockenperioden auf. Die Regenzeiten dominieren zwischen den Monaten März und Mai sowie Oktober und Dezember. Die Trockenzeiten treten dagegen in den Monaten von Januar bis März und verstärkt von Juni bis Oktober auf [49].

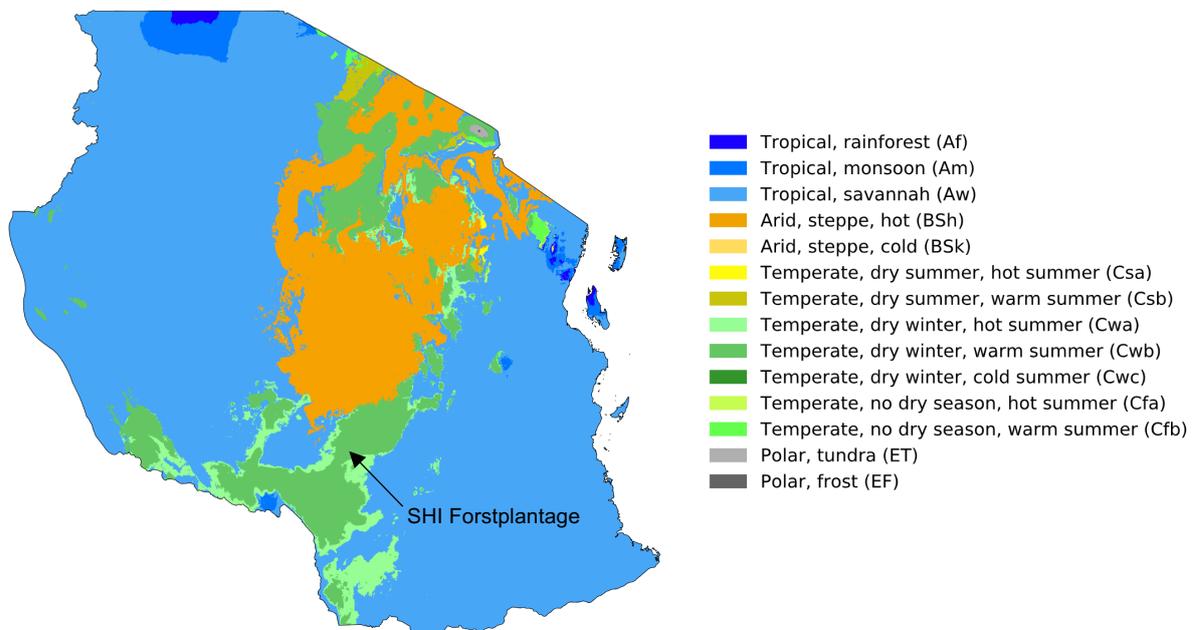


Abbildung 3-1: Klimazonen und -klassifikationen von Tansania nach Köppen und Geiger [48]

Herkunft der Prüfkörper

Die tansanische Flora besteht aus einer Mischung von gepflanzter und natürlicher Vegetation. Miombo-Wälder, Mangroven sowie Bergwälder bilden die drei Haupttypen der insgesamt 45,7 Mio. Hektar großen tansanischen Waldfläche [11]. Über die Hälfte der Waldfläche befindet sich dabei im Besitz der öffentlichen Hand [11]. Aufgrund des illegalen Raubbaus in Tansania gewinnen Waldplantagen immer mehr an Bedeutung und Fläche [10]. Die größte Plantage Tansanias ist die sogenannte *Sao Hill Industries Ltd.* (SHI) Forstplantage in Mufindi [50]. Sie umfasst eine Gesamtfläche von über 135.000 Hektar, wovon rund 54.000 Hektar mit Kiefern und 3.500 Hektar mit Zypressen und Eukalyptusarten bepflanzt sind [50]. Aus dieser Plantage stammen die Prüfkörper dieser Arbeit.

Die untersuchte Kiefernholzart *Pinus patula*, auch bekannt als *Mexican Weeping Pine* [51], stammt ursprünglich aus Mexico und wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts im Rahmen von Forstwirtschafts- und Aufforstungsprogrammen nach Tansania importiert [52]. Laut der Studie von Nyoka [53] zeichnen sich günstige Wachstumsbedingungen von *Pinus patula* durch feuchte Böden, gemäßigte Temperaturen und eine hohe Sonneneinstrahlung aus. Außerdem bevorzugt diese Baumart Höhenlagen zwischen 1500 und 3000 m. ü. NN. [53]. Die SHI Forstplantage liegt nach der Klassifikation von Köppen und Geiger in der Klimazone „Cwc“ (siehe Abbildung 3-1). „Cwc“ steht hierbei für die Klimazone „kaltes subtropisches Hochlandklima“ [48]. Ein Vergleich der klimatischen Bedingungen der SHI Forstplantage mit den idealen Wachstumsbedingungen nach Nyoka [53] zeigt, dass die Wachstumsbedingungen, wie zum Beispiel gemäßigte Temperaturen, feuchte Böden und bevorzugte Höhenlage, nahezu optimal erfüllt werden.

Aufgrund der auf der Plantage vorherrschenden idealen Bedingungen wachsen die Bäume dieser immergrünen Nadelbaumart zu Beginn ihres Lebenszyklus rasch. Fern [51] schreibt, dass *Pinus patula* aus Plantagen bereits nach acht Jahren eine Höhe von 15 m und nach 30 Jahren sogar eine Höhe von bis zu 35 m erreichen kann. In diesem Zeitraum ist es möglich, dass die Stämme auf einen Durchmesser von bis zu 1,2 m heranwachsen [51]. Mit einer mittleren Umtriebszeit der Kiefern von 14 Jahren [8] besitzt die Plantage somit eine jährliche Produktionskapazität von bis zu 84.000 m³ Schnittholz [50]. Im Gegensatz dazu wächst eine europäische Waldkiefer laut Schildbach [52] lediglich etwa 35 cm pro Jahr in die Höhe. Das bedeutet, dass sie nach acht Jahren nur eine maximale Höhe von ca. drei Metern erreicht [52].

Versuchsprogramm

In dieser Masterarbeit werden insgesamt 300 Schnitthölzer der tansanischen Kiefernholzart *Pinus patula* stammend aus der SHI-Forstplantage untersucht. Die Proben wurden in den Anlagen der Firma *Ante-Holz GmbH* auf die finale Abmessungen 45 x 90 mm gehobelt. Die Schnitthölzer wiesen bei Ankunft an der TUM FG Holztechnologie (HFM) eine Länge von 4 m auf.

Von den 300 Proben werden jeweils 100 Stück für Zugprüfungen und 100 Stück für hochkant Biegeprüfungen herangezogen. An diesen Prüfkörpern werden die nach EN 384 Abschnitt 1 Anmerkung 1 [30] erforderlichen festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften ermittelt. Im Vorfeld erfolgt an den Schnitthölzern eine Ermittlung des dynamischen E-Moduls sowie eine visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 [6]. Bei den restlichen 100 Proben handelt es sich um keilgezinkte Proben. Diese wurden ebenfalls bei der Firma *Ante-Holz GmbH* in Deutschland hergestellt. Bei der Prüfkörperherstellung wurden jeweils zwei unterschiedliche Schnittholzenden miteinander verklebt. Dabei wurde der Klebstoff Loctite® HB S109 verwendet. Der verwendete Klebstoff ist laut Datenblatt des Herstellers [54], ein flüssiger Einkomponenten-Polyurethanklebstoff (PU-Klebstoff), der unter Einfluss von Material und Luftfeuchte zu einem harten unspröden Film aushärtet. Bei den mechanischen Prüfungen des dritten Kollektivs liegt der Fokus auf der Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindung. Insofern werden hier vorab keine zerstörungsfreien Prüfverfahren angewandt.

Prüfkörpereinteilung in die Kollektive

Die Einteilung der Prüfkörper in die Zug- und Biegekollektive erfolgt auf Basis des dynamischen E-Moduls, welcher im Prüflabor der HFM ermittelt wurde (siehe Kapitel 3.7). Die beiden Kollektive werden durch die Anordnung der Werte des dynamischen E-Moduls in aufsteigender Reihenfolge gebildet, welche anschließend abwechselnd den beiden Kollektiven zugeordnet werden. Abbildung 3-2 zeigt die Histogramme der beiden Kollektive. Aufgrund der Histogramme können die Kollektive als gleichwertig angesehen werden.

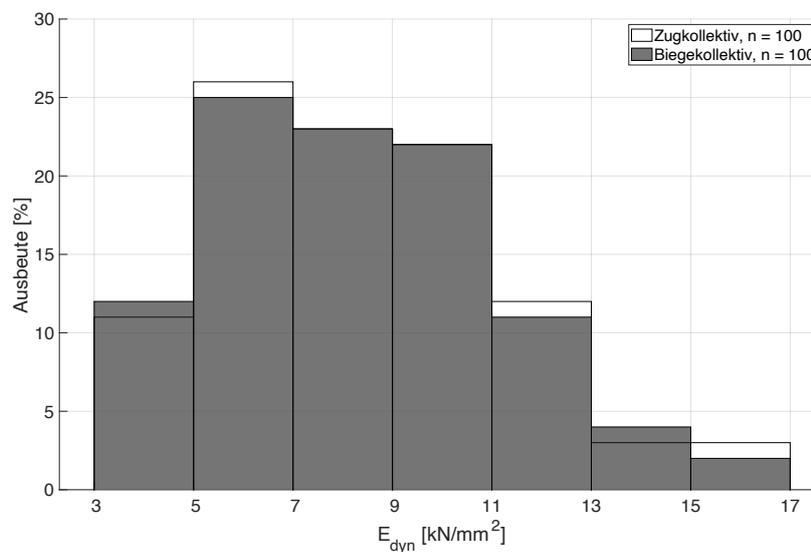


Abbildung 3-2: Histogramme der dynamischen E-Module des Zug- und Biegekollektivs, n = 100

Qualität der Prüfkörper

Das schnelle Wachstum zu Beginn der Lebensphase spiegelt sich vor allem in den Jahrringbreiten der Vollholzproben wider. Somit kommt es zu extremen Streuungen im Jungholzanteil. Deswegen werden bei der dynamischen Messung der Schnitthölzer Gewichtsunterschiede von bis zu 100% zwischen dem schwersten und dem leichtesten Prüfkörper dokumentiert. Außerdem wurden bei Ankunft der Prüfkörper Ende Oktober 2023 im Prüflabor der HFM starke Verformungen der Holzquerschnitte festgestellt. Dies ist wahrscheinlich auf einen unkontrollierten Anstieg der Holzfeuchte nach dem Hobeln der Prüfkörper in den Produktionshallen zurückzuführen. Bei der maschinellen Sortierung Ende September 2023 bei der Firma *MiCROTEC*[®] wiesen die Prüfkörper noch nicht so starke Verformungen auf.

Die Veränderung der Prüfkörperqualitäten zwischen Ende September und Ende Oktober 2023 ist in Abbildung 3-3 zu sehen. Bei der visuellen Sortierung an der HFM wurde eine mittlere Verdrehung der Prüfkörper von ca. 12 mm festgestellt. Verglichen mit der maximal zulässigen Verdrehung von 1,80 mm nach DIN 4074 [6] wird hier der zulässige Wert deutlich überschritten. Außerdem werden vereinzelt Fäulnisschäden an den Prüfkörperoberflächen festgestellt.

Infolge der eben aufgeführten Mängel der Schnitthölzer kann der Prüfbereich nicht immer gemäß EN 408 [3] im querschnittsschwächsten Bereich des Schnittholzes angeordnet werden. Es wird daher ein Kompromiss aus einer maximal möglichen Verwerfung für die Prüfmaschineneinspannung und einem querschnittsschwachen Bereich gewählt.



Abbildung 3-3: Qualität der Prüfkörper zwischen (a) Ende September 2023 und (b) Ende Oktober 2023

3.2 Bestimmung mechanischer und physikalischer Eigenschaften

Zugprüfung am Vollholz

Die Prüfung der Zugfestigkeit und des Zug-E-Moduls erfolgte in Anlehnung an EN 408 [3]. Dabei lag soweit möglich die querschnittsschwächste Stelle im Bereich der freien Prüflänge. Die Abmessungen und Belastungen eines Zugprüfkörpers sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Um ein Herausrutschen der Prüfkörper aus den Klemmbacken zu vermeiden, wurde die Einspannlänge der Zugprüfkörper auf 600 mm festgelegt. Zur Bestimmung des Zug-E-Moduls wurde die Zugdehnung mit einer Messbasis von 450 mm, also dem 5-fachen der Querschnittshöhe, symmetrisch auf beiden Schmalseiten des Prüfkörpers mit zwei Induktiv-Wegaufnehmern gemessen. Die freie Prüflänge betrug das 9-fache der Querschnittshöhe, also 810 mm. Durch den beidseitigen Abstand von 180 mm von den Klemmbacken sollte ein Einfluss des Einspannbereichs auf das 450 mm lange Brettelement ausgeschlossen werden.

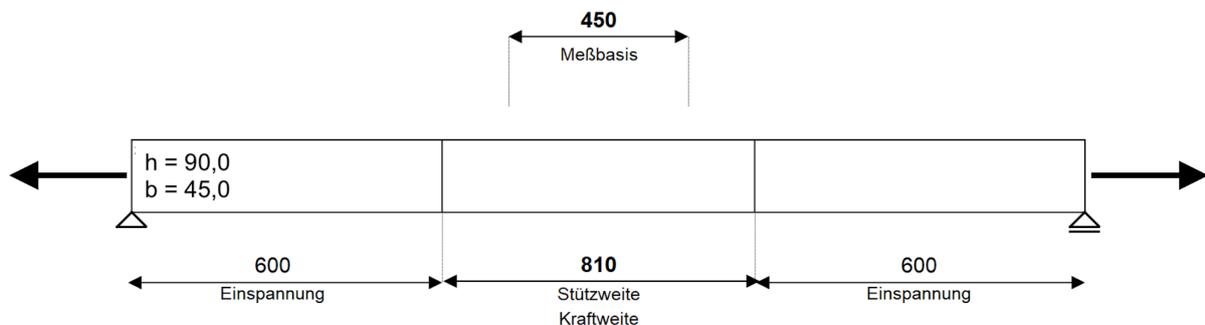


Abbildung 3-4: Abmessungen und Belastungen eines Zugprüfkörpers [3] - Maße in [mm]

Die Kraft wurde hierbei über Gelenkbolzen und Einspannbacken eingeleitet. Zudem wurde der Versuch weggesteuert durchgeführt. Damit ein seitliches Ausweichen des Prüfkörpers ausgeschlossen werden konnte, liefen die starren Klemmbacken in einer Führung. Die konstante Vorschubgeschwindigkeit des Belastungskolbens wurde so gewählt, dass der Bruch innerhalb von 300 ± 120 Sekunden eintrat. Allerdings war dies wegen der Qualitätsschwankungen der Prüfkörper nicht immer möglich. Die mittlere Prüfzeit bis zum Versagen lag bei 157 Sekunden. Die Messunsicherheit der Prüfung lag bei 1%. Die Prüfanordnung der Zugprüfung an der HFM ist in Abbildung 3-5 zu sehen.



Abbildung 3-5: Prüfanordnung der Zugprüfung an der TUM FG Holztechnologie

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit und des Zug-E-Moduls in Faserrichtung wurden im Vorfeld die Durchschnittswerte der Querschnittsabmessungen, ebenso wie die Gesamtlänge und das Gewicht des Prüfkörpers bestimmt. Die Zugfestigkeit in Faserrichtung $f_{t,0}$ wurde nach Gleichung (3.1) [3] berechnet.

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.1)$$

F_{max}	[N]	maximale Zugkraft vor dem Bruch
A	[mm ²]	Querschnittsfläche des Prüfkörpers

Der Zug-E-Modul in Faserrichtung wurde aus einer linearen Regression der Last-Verformungs-Kurve als Teil des Messwerterfassungsprogramms der HFM berechnet. Das Programm ermittelte dabei die Regressionsgerade zwischen der Kraft und den Verformungen sowie das Bestimmtheitsmaß R^2 . Der E-Modul ist letztendlich die Steigung der Last-Verformungs-Kurve aus Abbildung 3-6 [3].

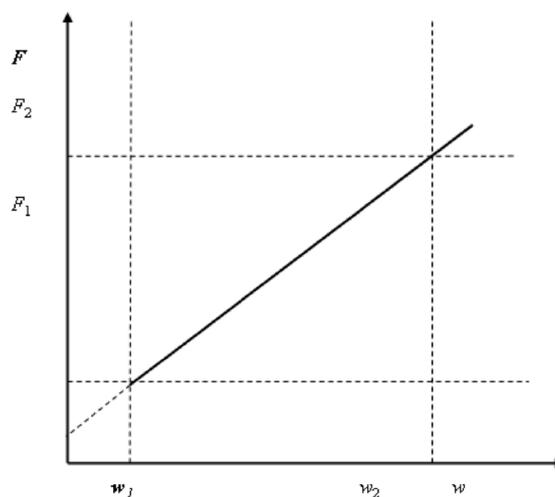


Abbildung 3-6: Last-Verformungs-Kurve innerhalb des Bereichs der elastischen Verformung [3]

Die Regressionsanalyse wurde mit einem Kurvenabschnitt zwischen $0,1 F_{max}$ und $0,4 F_{max}$ durchgeführt. Nach EN 408 Abschnitt 12.3 [3] muss der Korrelationskoeffizient zwischen Kraft und Verformung größer als 0,99 sein. War dies nicht der Fall, wurde ein neuer Kurvenabschnitt verwendet, dessen Mindestlänge jedoch zwischen $0,2 F_{max}$ und $0,3 F_{max}$ liegen musste. Der Zug-E-Modul in Faserrichtung $E_{t,0}$ wurde nach Gleichung (3.2) [3] berechnet.

$$E_{t,0} = \frac{l_1 \cdot (F_2 - F_1)}{A \cdot (w_2 - w_1)} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.2)$$

l_1	[mm]	Messlänge zur Bestimmung des E-Moduls
$F_2 - F_1$	[N]	Laststeigerung im linearen Bereich
$w_2 - w_1$	[mm]	Verformungszunahme entsprechend $F_2 - F_1$

Ausschuss der Proben aus dem Zugkollektiv

Im Rahmen der Vorsortierung wurden insgesamt 10 Prüfkörper aussortiert. Der Ausschuss umfasste die Prüfkörper mit den Nummern 024, 031, 071, 075, 090, 092, 093, 096, 103 und 133. Hauptgrund für die Aussortierung waren die extremen Verdrehungen der einzelnen Prüfkörper (siehe Kapitel 3.1). Die aussortierten Prüfkörper hätten wahrscheinlich bereits bei der Einspannung in die Zugmaschine infolge des auftretenden Torsionsmomentes versagt.

Biegeprüfung am Vollholz

Die Biegefestigkeiten sowie die lokalen und globalen Biege-E-Module wurden ebenfalls in Anlehnung an EN 408 [3] überwiegend am querschnittsschwächsten Bereich der Prüfkörper bestimmt. Die Abmessungen und Belastungen eines Biegeprüfkörpers sind in Abbildung 3-7 dargestellt. Wie aus der Abbildung hervorgeht, wurden die Prüfkörper dabei als Balken auf zwei Stützen gelagert. Die Überlänge je Prüfkörperende betrug 190 mm. Die Lasteinleitung in den Drittelpunkten erfolgte über einen gelenkig gelagerten Querverteiler. Zur Bestimmung des lokalen Biege-E-Moduls wurde die Biegedehnung in der neutralen Faser mit einer Messbasis von 450 mm symmetrisch auf beiden Seiten des Prüfkörpers mit zwei Induktiv-Wegaufnehmern gemessen. Die Länge der Messbasis entsprach dem 5-fachen der Querschnittshöhe. Die Verformung zur Bestimmung des globalen Biege-E-Moduls wurde in der neutralen Faser des Prüfkörpers gemessen. Jedoch wurde hierfür ein Seilzug verwendet. Dieser wurde, wie in Abbildung 3-8 zu sehen ist, an der Basis des Prüfstandes angebracht. Die freie Prüflänge betrug 1620 mm, also das 18-fache der Querschnittshöhe.

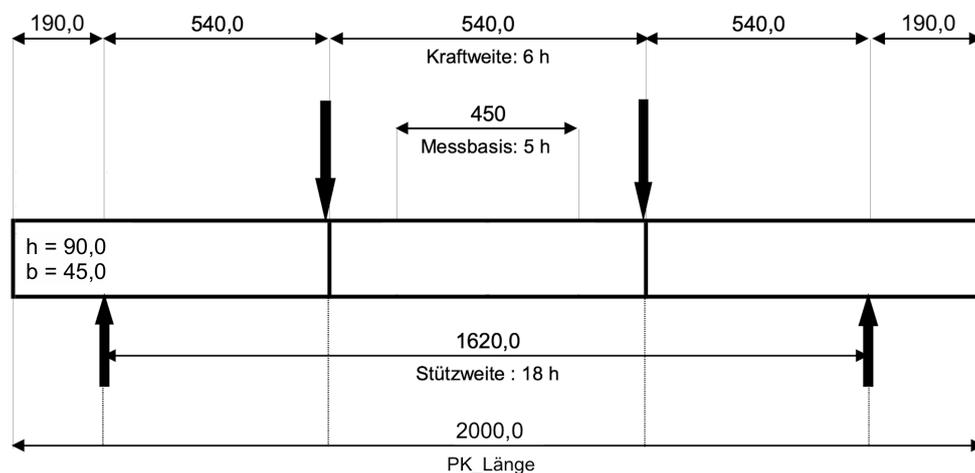


Abbildung 3-7: Abmessungen und Belastungen eines Biegeprüfkörpers [3] - Maße in [mm]

Um ein mögliches Biegedrillknicken aufgrund der in Kapitel 3.1 beschriebenen Prüfkörperqualität während der Versuchsdurchführung zu verhindern, wurden seitliche Führungsschienen an den Auflagerpunkten angebracht. Diese Führungsschienen ermöglichten eine reibungsfreie Durchbiegung des Prüfkörpers. Außerdem wurden 65 mm breite Buchenfurnierschichthölzer zwischen den Prüfkörper und der Lasteinleitungspunkte eingelegt, um örtliche Einrückungen zu reduzieren. Nach EN 408 [3] sind jedoch Verbreiterungen der Lasteinleitungspunkte von lediglich 45 mm zulässig. Die

Prüfung wurde ebenfalls mit einer Messunsicherheit von 1% weggesteuert durchgeführt. Für die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit des Belastungskolbens galten die Rahmenbedingungen aus der Zugprüfung. Im Durchschnitt lag die Prüfzeit bei 415 Sekunden. Abbildung 3-8 zeigt die Prüfanordnung der Biegeprüfung am Lehrstuhl für Baukonstruktion und Holzbau der TUM.



Abbildung 3-8: Prüfanordnung der Biegeprüfung am Lehrstuhl für Baukonstruktion und Holzbau der TUM

Zur Bestimmung der Biegefestigkeit und der Biege-E-Module in Faserrichtung wurden vorab die durchschnittlichen Werte der Querschnittsabmessungen sowie die Gesamtlänge des Prüfkörpers erfasst. Das Gewicht der Prüfkörper zum Zeitpunkt der Prüfung wurde hier nicht mit aufgenommen. Die Biegefestigkeit in Faserrichtung f_m wurde nach Gleichung (3.3) [3] berechnet.

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot a}{b \cdot h^2} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.3)$$

F_{max}	[N]	maximale Biegekraft vor dem Bruch
a	[mm]	Abstand zwischen Laststelle und Auflager
b	[mm]	Breite des Prüfkörpers
h	[mm]	Höhe des Prüfkörpers

Die Biege-E-Module in Faserrichtung wurden ebenfalls aus einer linearen Regression der Last-Verformungs-Kurve berechnet. Für die Regressionsanalyse galten die gleichen Bedingungen wie beim Zugkollektiv. Jedoch wurden die E-Module auf Grundlage der mittleren Verformung aus beiden Seiten des Prüfkörpers ermittelt. Der lokale Biege-E-Modul $E_{m,l}$ berechnet sich nach Gleichung (3.4) [3] und der globale Biege-E-Modul $E_{m,g}$ nach Gleichung (3.5) [3].

$$E_{m,l} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot I \cdot (w_2 - w_1)} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.4)$$

$$E_{m,g} = \frac{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \cdot \left(2 \cdot \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.5)$$

a	[mm]	Abstand zwischen Laststelle und Auflager
b	[mm]	Breite des Prüfkörpers
h	[mm]	Höhe des Prüfkörpers
l	[mm]	Spannweite
l_1	[mm]	Messlänge zur Bestimmung des E-Moduls
I	[mm ⁴]	Flächenmoment 2. Grades
$F_2 - F_1$	[N]	Laststeigerung im linearen Bereich
$w_2 - w_1$	[mm]	Verformungszunahme entsprechend $F_2 - F_1$

Ausschuss der Proben aus dem Biegekollektiv

Aufgrund der in Kapitel 3.1 angesprochenen Qualität der Prüfkörper kam es zu einem Ausschuss von insgesamt vier Prüfkörpern beim Biegekollektiv. Dabei handelte es sich um die Prüfkörper mit den Nummern 002, 019, 020, 035 und 048. Im Vergleich zum Zugkollektiv wurden die Prüfkörper nicht aufgrund von Längs- und Querkrümmungen oder Verdrehungen aussortiert, da in der Prüfanordnung seitliche Führungsschienen zur Vermeidung eines möglichen Biegedrillknickens vorgesehen waren. Grund für die Aussortierung des Prüfkörpers mit der Nummer 020 war eine extreme mechanische Beschädigung über den gesamten Prüfkörper. Die Prüfkörper mit den Nummern 002, 019 und 048 wurden angesichts enormer Fäulniserscheinungen an den Schnittholzoberflächen nicht berücksichtigt. Der Prüfkörper mit der Nummer 035 wurde wegen einer fehlerhaften Messung ausgeschlossen.

Biegeprüfung an Keilzinkenverbindungen

Die Prüfanordnung und -durchführung an Keilzinkenverbindungen orientierte sich am Prinzip der Biegeprüfungen von Vollholz. Abbildung 3-9 veranschaulicht die Abmessungen und Belastungen eines Keilzinkenprüfkörpers. Da es sich bei der Biegeprüfung an den Keilzinkenverbindungen um einen flachkant 4-Punkt-Biegeversuch handelte, betrug die freie Prüfkörperlänge hier nur 810 mm.

In Anbetracht der geringen Verdrehungen der Prüfkörper dieses Kollektivs erfolgte keine Montage von Führungsschienen an den Auflagern. Im Vergleich zu den Biegeprüfungen am Vollholz wurden hier die Anforderungen gemäß EN 408 [3] bezüglich der Verbreiterung der Lasteinleitungspunkte von 22,5 mm eingehalten. Die durchschnittliche Prüfzeit bei den Biegeprüfungen an den Keilzinken lag bei 354 Sekunden. Da für die Beurteilung der Keilzinkenverbindungen nur die Biegefestigkeit herangezogen wurde, erfolgte hier keine Verformungsmessung. In Abbildung 3-10 ist die Prüfanordnung für die Keilzinkenprüfung am Lehrstuhl für Baukonstruktion und Holzbau der TUM dargestellt.

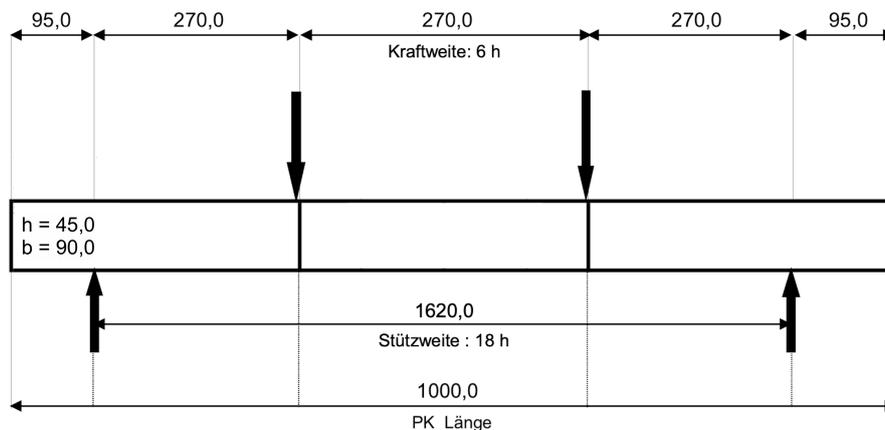


Abbildung 3-9: Abmessungen und Belastungen eines Keilzinkenprüfkörpers [3] - Maße in [mm]

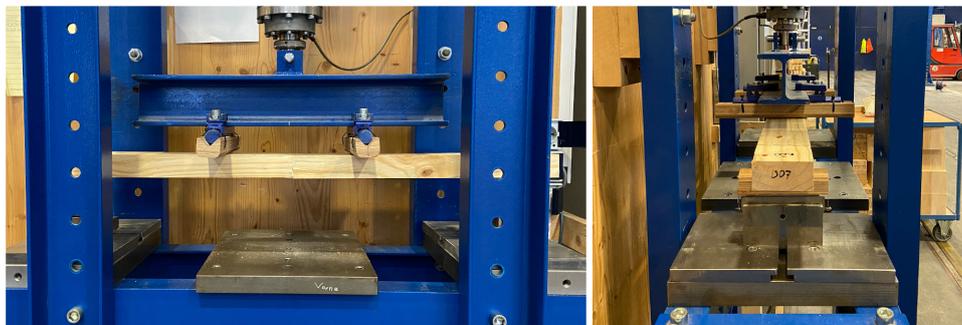


Abbildung 3-10: Prüfanordnung der Keilzinkenprüfung am Lehrstuhl für Baukonstruktion und Holzbau der TUM

Da die Stelle der Keilzinkenverbindung nach der Verklebung nicht erneut gehobelt wurde, wiesen die Prüfkörper unterschiedliche Querschnittsabmessungen an der Verbindungsstelle auf. Daher wurde vorab die Nettoquerschnittsfläche jeder Keilzinkenverbindung bestimmt. Die Querschnittshöhe war bei allen Prüfkörpern identisch, jedoch variierte die Querschnittsbreite der einzelnen Prüfkörper. Die Biegefestigkeit in Faserrichtung f_m einer Keilzinkenverbindung wurde nach Gleichung (3.3) [3] berechnet.

Bruchbilder

Bei der Bruchbeurteilung der Keilzinkenverbindungen wurde zwischen drei möglichen Versagensarten unterschieden. $Bruch_a$ steht hierbei für einen Bruch des Prüfkörpers außerhalb der Keilzinkenverbindung. Analog hierzu stehen die Abkürzungen $Bruch_{Gr}$ für Grundbruch und $Bruch_S$ für Scherbruch der Keilzinkenverbindung. Die Angabe der jeweiligen Versagensarten erfolgte in Abhängigkeit von der Prüfkörperbreite auf 10% genau. Zum besseren Verständnis werden die unterschiedlichen Bruchbilder und deren Anteile an Prüfkörper 015 beispielhaft in Abbildung 3-11 veranschaulicht.

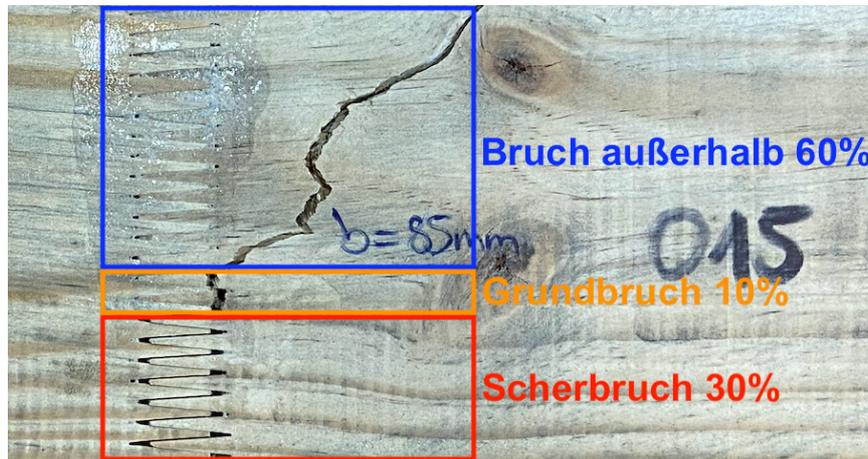


Abbildung 3-11: Beispiel zur Aufnahme der Bruchbilder von Keilzinkenverbindungen am Prüfkörper 015

Ausschuss der Proben aus dem Keilzinkenkollektiv

Bei der Datenauswertung der Keilzinkenverbindungen blieben insgesamt 12 Prüfkörper unberücksichtigt, da diese zu 100% außerhalb der Verbindungsstelle versagten. Dabei handelte es sich um die Prüfkörper mit den Nummern 007, 020, 053, 064, 067, 072, 077, 080, 084, 088, 091 und 098. Hauptversagensart war bei 50% aller oben genannten Prüfkörper ein Ast außerhalb der Keilzinkenverbindung.

Rohdichte und Holzfeuchte

Zur Bestimmung der Rohdichte und Holzfeuchte wurde nach den Prüfungen ein ca. 20 mm breiter, ast- und harzgallenfreier Probestreifen nahe der Bruchstelle entnommen, der den ganzen Querschnitt umfasste. Bei den keilgezinkten Prüfkörpern wurde je Prüfkörperende eine Darrscheibe entnommen. Die Darrscheiben wurden direkt nach dem Herausschneiden gewogen und anschließend bei einer Temperatur von $102 \pm 3^\circ\text{C}$ bis zur Gewichtskonstanz gedarrt. Nach der Ofentrocknung wurde die Masse des Probestreifens mit einer Präzisionswaage auf ein Hundertstel Gramm genau gemessen und das Volumen über eine Auftriebsmessung bestimmt. Das Volumen wurde dabei auf Grundlage des archimedischen Prinzips ermittelt. Dieses besagt, dass das Gewicht des von einem Körper angezeigten Wassers gleich dem Volumen des Körpers ist. Anhand des aus der Auftriebsmessung bestimmten Volumens und dem Gewicht der Darrscheibe nach der Ofentrocknung wurde die Darrdichte berechnet. Der Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der Prüfung u_{stat} wurde nach EN 13183 [55] bestimmt (siehe Gleichung (3.6)).

$$u_{stat} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.6)$$

m_1	[g]	Masse der Darrscheibe zum Zeitpunkt der Prüfung
m_0	[g]	Masse der Darrscheibe im darrtrockenen Zustand

Umrechnungsfaktoren

Die Prüfergebnisse jedes einzelnen Prüfkörpers wurden auf die genormten Bezugsbedingungen nach EN 384 Abschnitt 5.3 [30] umgerechnet. Dieser Abschnitt sieht eine Anpassung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften auf einen Referenzfeuchtegehalt von $u_{ref} = 12\%$ vor. Somit ergeben sich folgende Gleichungen für die Anpassung der Rohdichte (3.7) [30] und der E-Module in Faserrichtung (3.8) [30]:

$$\rho = \rho_u \cdot (1 - 0,005 \cdot (u - u_{ref})) \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.7)$$

$$E_0 = E_{0,u} \cdot (1 + 0,01 \cdot (u - u_{ref})) \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.8)$$

ρ_u	[kg/m ³]	Rohdichte zum Zeitpunkt der Prüfung
$E_{0,u}$	[N/mm ²]	E-Modul in Faserrichtung zum Zeitpunkt der Prüfung
u	[%]	Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Prüfung

Außerdem wurde sowohl die Zug- als auch die Biegefestigkeit auf eine Referenzhöhe von 150mm durch Division mit dem Faktor k_h aus Gleichung (3.9) [30] umgerechnet.

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}, 1,3 \right\} \quad [-] \quad (3.9)$$

h	[mm]	Höhe des Prüfkörpers
-----	------	----------------------

3.3 Statistische Grundlagen

Bei der Verwendung eines bestimmten Materials im Bausektor muss der bemessende Ingenieur oder Architekt gewährleisten, dass dies zuverlässig und sicher ist. Da die versuchstechnisch ermittelten unterschiedlichen Baustoffkenngrößen aufgrund von Messunsicherheiten, Modellunschärfen und Materialeigenschaften gewisse Streuungen aufweisen (siehe Kapitel 2.1), ist oftmals die Anwendung von statistischen Vorhersagemodellen erforderlich. In diesem Kapitel werden die statistischen Grundlagen unterschiedlicher Vorhersagemodelle basierend auf der Literatur von Augustin [19] erklärt.

Statistische Kennwerte

Die quantitative Beschreibung der Prüfergebnisse erfolgt durch die Verwendung einzelner statistischer Kennzahlen. Diese werden durch die folgende Gleichungen zunächst kurz erläutert. Mithilfe der Varianz aus Gleichung (3.11) [19] und der Standardabweichung aus Gleichung (3.12) [19] kann die Streuung der Prüfergebnisse beschrieben werden. Der Variationskoeffizient aus Gleichung (3.13) ist nach Augustin [19] „eine Maßzahl für die relativen Schwankungen der Stichprobe und lässt insbesondere den Vergleich der Streuung unterschiedlicher Stichproben desselben Grundgesamtheitstypus zu“.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Mittelwert (arithmetisches Mittel)} \quad (3.10)$$

$$V = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Varianz} \quad (3.11)$$

$$s = \sqrt{V} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Standardabweichung} \quad (3.12)$$

$$VK = \frac{s}{\bar{x}} \quad \text{Variationskoeffizient} \quad (3.13)$$

n	Anzahl der Messwerte
x_i	i-ter Messwert

Statistische Verteilungsfunktionen

Je nach Größe der Streuung können die Prüfergebnisse durch verschiedene statistische Verteilungen unterschiedlich gut repräsentiert werden. Nach dem „Best-Fitting Model“ ist die bestmögliche Anpassung der Prüfergebnisse durch die statistischen Verteilungen anzustreben. Im Bereich des Holzbaues und der Holztechnologie werden dabei für die üblichen Kenngrößen grundsätzlich folgende Verteilungen vorgeschlagen [16], [19]:

- Rohdichte: Normalverteilung
- E-Modul: Normalverteilung
- Festigkeit: Normalverteilung, Log-Normalverteilung, Weibullverteilung

Die Häufigkeitsverteilung der Normal- und Log-Normalverteilung werden nach den folgenden Gleichungen [19] berechnet. Die Darstellung der Funktionen hinsichtlich des „Best-Fitting Models“ der Verteilungen der Prüfergebnisse erfolgte mithilfe des Rechenprogramms Matlab (Version MATLAB_R2023b).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad \begin{array}{l} \text{Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion} \\ \text{Normalverteilung} \end{array} \quad (3.14)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad \begin{array}{l} \text{Kumulierte Häufigkeitsfunktion} \\ \text{Normalverteilung} \end{array} \quad (3.15)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \frac{1}{x - x_0} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x-x_0) - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2} \quad \begin{array}{l} \text{Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion} \\ \text{Log-Normalverteilung} \end{array} \quad (3.16)$$

$$F(x) = \int_{x_0}^x f(x) dx \quad \begin{array}{l} \text{Kumulierte Häufigkeitsfunktion} \\ \text{Log-Normalverteilung} \end{array} \quad (3.17)$$

Für eine anfängliche Übersicht über die Messdaten wird auf eine grafische Darstellung in Form eines Histogramms zurückgegriffen. Hierbei werden die Prüfdaten in Klassen eingeteilt, welche statistisch als Ränge bezeichnet werden. Eine grobe Schätzung der Anzahl dieser Ränge kann mittels der folgenden Gleichung [19] vorgenommen werden:

$$k = 5 \cdot \log(n) \quad (3.18)$$

k	Anzahl der Ränge	
n	Anzahl der Prüfergebnisse	

Vorhersage mechanischer Werte durch Regressions- und Korrelationsanalysen

Lineare Regressionsanalyse

Bei der Regressionsanalyse wird der Zusammenhang zweier voneinander abhängiger statistischer Zufallsgrößen durch eine mathematische Funktion beschrieben. Im Allgemeinen wird zwischen der linearen und nichtlinearen Regressionsanalyse unterschieden. Im Folgenden wird sich jedoch auf die Erläuterung der linearen Regressionsanalyse beschränkt, da diese für die Analyse der Prüfergebnisse von größerer Bedeutung ist.

Bei der linearen Regressionsanalyse wird das Modell durch die Geradengleichung in der Form $y = a + b \cdot x$ vorgegeben. Dabei sind a und b zwei unbekannte Parameter die den Zusammenhang zwischen den zwei Wertepaaren x_i und y_i beschreiben. Die Parameter a und b werden dabei durch die „Methode der kleinsten Quadrate“ berechnet.

Lineare Korrelationsanalyse

Das Ziel der linearen Korrelationsanalyse besteht darin, sowohl das Stärkemaß als auch die Richtung des Zusammenhangs zwischen den zwei Zufallsgrößen x und y anzugeben. In der Statistik

wird dieser Sachverhalt sowohl durch den sogenannten Korrelationskoeffizienten R als auch das sogenannte Bestimmtheitsmaß B ausgedrückt. Der Unterschied beider Variablen besteht darin, dass das Bestimmtheitsmaß im Gegensatz zum Korrelationskoeffizienten lediglich die Stärke, nicht jedoch die Richtung des Zusammenhangs zwischen den Zufallsgrößen angibt. Der wohl bekannteste Korrelationskoeffizient ist der Korrelationskoeffizient nach Pearson [19]. Dieser berechnet sich nach Gleichung (3.19) [19]. Das Bestimmtheitsmaß ist das Quadrat des Korrelationskoeffizienten.

$$R = \frac{1}{n-1} \cdot \sum \left(\frac{x - \bar{x}}{s_x} \right) \cdot \left(\frac{y - \bar{y}}{s_y} \right) \quad \text{Korrelationskoeffizient nach Pearson} \quad (3.19)$$

Im Allgemeinen wird zwischen drei möglichen Ausprägungsformen des Korrelationskoeffizienten unterschieden. Bei $R = 0$ besteht kein Zusammenhang und bei $R = 1$ ein hoher linearer Zusammenhang zwischen den beiden Zufallsgrößen. Trifft $0 < R < 1$ zu, so liegt eine stochastische Abhängigkeit beider Zufallsgrößen vor.

3.4 Bestimmung der charakteristischen Kennwerte

Die Bestimmung der charakteristischen Kennwerte erfolgte nach dem in EN 14358 Abschnitt 3 [56] beschriebenen statistischen Verfahren. Im Allgemeinen wurde für die Berechnung der charakteristischen Werte ein Vertrauensniveau von $\alpha = 75\%$ angesetzt. Das Vertrauensniveau α wird als die Wahrscheinlichkeit festgelegt, mit der der tatsächliche Wert über dem geschätzten Wert des charakteristischen Wertes liegt [56].

Berechnung der 5%-Quantile

Die Berechnung der 5%-Quantile erfolgte nach dem parametrischen Verfahren der oben genannten Norm. Nach dem Prinzip des „Best-Fitting Model“ wurde dabei die Verteilung bezüglich der Rohdichten am besten durch die empirische Normalverteilung beschrieben. Die Verteilung der Festigkeits-eigenschaften wurde hingegen am besten durch die Log-Normalverteilung beschrieben. Dies entspricht auch den Erkenntnissen der aktuellen Literatur, wie sie in Kapitel 3.3 beschrieben wurde und der Empfehlung nach EN 14358 [56]. Die beiden Berechnungsverfahren werden im Folgenden kurz erläutert. Der Mittelwert \bar{y} , die Standardabweichung s_y und der charakteristische Wert m_k einer Stichprobe berechnet sich bei diesem Verfahren wie folgt [56]:

Log-Normalverteilung		Normalverteilung	
$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln(m_i)$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$ (3.20)	$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_i$	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (3.21)
$s_y = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(m_i) - \bar{y})^2} \\ 0,05 \end{array} \right.$	(3.22)	$s_y = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2} \\ 0,05 \cdot \bar{y} \end{array} \right.$	(3.23)
$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n) \cdot s_y)$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$ (3.24)	$m_k = \bar{y} - k_s(n) \cdot s_y$	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (3.25)

m_i Prüfergebnis eines Prüfkörpers

$k_s(n) = \frac{6,5 \cdot n + 6}{3,7 \cdot n - 3}$ Faktor zur Berechnung der charakteristischen Werte im Rahmen der Erstprüfung

Berechnung charakteristischer Mittelwerte

Für die Berechnung der charakteristischen Mittelwerte wurde das in der oben genannten Norm beschriebene Verfahren aus Abschnitt 3.3 [56] herangezogen. Dabei wurden die charakteristischen Mittelwerte unter Berücksichtigung von Vertrauensintervallen berechnet. Die Gleichungen für den Mittelwert \bar{y} , die Standardabweichung s_y und den charakteristischen Mittelwert m_{mean} einer Stichprobe sind im Folgenden aufgeführt [56]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.26)$$

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}, 0,05 \cdot \bar{y} \right. \quad (3.27)$$

$$m_{mean} = \bar{y} - k_s(n) \cdot s_y \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.28)$$

m_i Prüfergebnis eines Prüfkörpers

$k_s(n) = \frac{0,78}{n^{0,53}}$ Faktor zur Berechnung der charakteristischen Werte im Rahmen der Erstprüfung

3.5 Optimale Sortierung

Für die Bestimmung der optimalen Sortierklasse beziehungsweise Sortierklassenkombination wurde das in EN 14081-2 Abschnitt C.2 [5] beschriebene Verfahren verwendet. Nach diesem Verfahren erfolgt die Sortierung der Prüfkörper der Gesamtprobe anhand ihrer sortierklassenbestimmenden Eigenschaften, welche durch die zerstörenden Prüfmethoden aus Kapitel 3.2 ermittelt wurden. Ziel der Sortierung war es, die höchstmögliche Ausbeute in der höchsten Sortierklasse zu erreichen. Die auf diese Weise festgelegte Sortierklasse wurde als die optimale Sortierklasse definiert. Besonders berücksichtigt dabei wurden die Festigkeitsklassen und Festigkeitsklassenkombination sowohl zur Herstellung der gängigsten Vollholz- als auch BSH-Festigkeitsklassen (GI24c/h, GI28c/h und GI30c/h) nach EN 14080 [26].

Eine Sortierklasse wurde einer Festigkeitsklasse nach EN 338 [4] zugeordnet, wenn ihre charakteristischen Werte den in den Festigkeitsklassen festgelegten Grenzwerten entsprachen. Die Berechnung der charakteristischen Grenzwerte erfolgte nach dem in Kapitel 3.4 beschriebenen Verfahren. Die erforderlichen charakteristischen Grenzwerte beziehen sich dabei auf die 5%-Quantile der Festigkeiten und Rohdichten sowie auf 95% der charakteristischen Mittelwerte der E-Module. Die Grenzwerte der Festigkeiten, Steifigkeiten und Rohdichten auf Grundlage von Zugprüfungen sind in Tabelle 3-1 aufgeführt. Tabelle 3-2 zeigt die Grenzwerte, die auf Biegeprüfungen basieren.

Vorgehensweise

Die verwendete Methode zur Berechnung der optimalen Sortierklasse beziehungsweise Sortierklassenkombination wird im Folgenden erläutert. Zuerst wurden die Daten nach den festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften sortiert. Die Sortierung erfolgte dabei immer in der Reihenfolge Festigkeit, E-Modul und Rohdichte. Diese Reihenfolge änderte sich jedoch, je nachdem nach welcher Eigenschaft sortiert wurde. Wurde beispielsweise primär nach der Rohdichte sortiert, so war das zweite Sortierkriterium die Festigkeit und das Dritte der E-Modul.

Zu Beginn wurde der gesamte Datensatz nur nach der Festigkeit, anschließend nur nach der Steifigkeit und zuletzt nur nach der Rohdichte sortiert. Die Sortierung erfolgte dabei in absteigender Reihenfolge der Eigenschaften. Die Anzahl der Prüfkörper, die den jeweiligen erforderlichen charakteristischen Grenzwert einhielt, wurde durch Abzählen ermittelt. Dabei wurde ein Prüfkörper nach dem anderen, beginnend mit dem Prüfkörper mit der niedrigsten Eigenschaft, aus der Berechnung ausgeschlossen, bis der Grenzwert eingehalten wurde.

Die endgültige optimale Sortierklasse wurde erst durch die Sortierung nach der zweiten und dritten Eigenschaft bestimmt. Auch diese Eigenschaften mussten die erforderlichen charakteristischen Grenzwerte einhalten. Im Folgenden wird die Nomenklatur aus der oben genannten Norm [5] verwendet. Die sortierklassenbestimmende Eigenschaft mit der höchsten Prüfkörperanzahl wird mit (a) abgekürzt, während diejenige mit der geringsten Prüfkörperanzahl als (c) bezeichnet wird. Waren die Prüfkörperanzahlen der jeweiligen sortierklassenbestimmenden Eigenschaften bekannt, so wurden nur noch die Prüfkörper aus (a) ausgewählt. Für diese Prüfkörper erfolgte anschließend eine Sortierung in der Reihenfolge (b), (c) und (a). Anschließend wurden nur noch die Prüfkörper aus (b)

bei der Berechnung der charakteristischen Kennwerte berücksichtigt. Diese Prüfkörper wurden zuerst nach (c), dann nach (b) und schließlich wieder nach (a) sortiert. Wurden alle erforderlichen Grenzwerte der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften eingehalten, so wurden die ausgewählten Prüfkörper der optimalen Sortierklasse zugeordnet. War dies nicht der Fall wurde das Verfahren entsprechend wiederholt. Anschließend wurde das oben beschriebene Verfahren für alle Festigkeitsklassen, beginnend mit der nächsthöheren Klasse wiederholt, bis die höchstmögliche Festigkeitsklasse erreicht wurde. Bei der Sortierung in die höheren Festigkeitsklassen wurde versucht, die Prüfkörper des Ausschusses in niedrigere Festigkeitsklassen einzustufen. So entstanden verschiedenen Klassenkombinationen.

Tabelle 3-1: Charakteristische und erforderliche Kennwerte für die Zugfestigkeitsklassen nach EN 338 [4]

Festigkeits- klasse	$f_{t,0,k}$	$E_{t,0,mean}$	ρ_k	$f_{t,erf}$	$E_{t,erf}$ <small>= $0,95 \cdot E_{t,0,mean}$</small>	$\rho_{t,erf}$
T8	8,0	7,0	290	8,0	6,7	290
T9	9,0	7,5	300	9,0	7,1	300
T10	10,0	8,0	310	10,0	7,6	310
T12	12,0	9,5	330	12,0	9,0	330
T13	13,0	10,0	340	13,0	9,5	340
T14	14,0	11,0	350	14,0	10,5	350
T14,5	14,5	11,0	350	14,5	10,5	350
T15	15,0	11,5	360	15,0	10,9	360
T16	16,0	11,5	370	16,0	10,9	370
T18	18,0	12,0	380	18,0	11,4	380
T21	21,0	13,0	390	21,0	12,4	390
T22	22,0	13,0	390	22,0	12,4	390

Tabelle 3-2: Charakteristische und erforderliche Kennwerte für die Biegefestigkeitsklassen nach EN 338 [4]

Festigkeits- klasse	$f_{m,k}$	$E_{m,0,mean}$	ρ_k	$f_{m,erf}$	$E_{m,erf}$ <small>= $0,95 \cdot E_{m,0,mean}$</small>	$\rho_{m,erf}$
C14	14,0	7,0	290	14,0	6,7	290
C16	16,0	8,0	310	16,0	7,6	310
C18	18,0	9,0	320	18,0	8,6	320
C22	22,0	10,0	340	22,0	9,5	340
C24	24,0	11,0	350	24,0	10,5	350
C27	27,0	11,5	360	27,0	10,9	360

3.6 Visuelle Sortierung

Visuelle Sortiermerkmale

Die Aufnahme der visuellen Sortierkriterien erfolgte in Anlehnung an DIN 4074-1 [6]. Nach Tabelle 1 dieser Norm [6] wird zwischen den Schnittholzarten Latte, Brett/Bohle und Kantholz unterschieden. Aufgrund der Querschnittsdimensionen und Prüfungsanordnung konnten alle Prüfkörper der Schnittholzart Kantholz zugeordnet werden. Es wurden jedoch auch die Sortierkriterien für Bretter/Bohlen berechnet, um eine umfangreichere visuelle Sortierung zu ermöglichen. Der hohe Anteil an Ästen mit einem Durchmesser größer 5 mm führte dazu, dass die visuelle Sortierung ausschließlich auf den prüfrelevanten Bereich des Schnittholzes beschränkt wurde.

Die Äste wurden mit Hilfe des an der HFM entwickelten Programms zur Asterfassung aufgenommen. Sortiermerkmale, wie zum Beispiel Risse, Baumkanten, Verfärbungen, Insektenfraß und sonstige Merkmale wurden dabei im Programm als Bemerkungen hinterlegt. Auf die Vorgehensweise zur Bestimmung der Sortiermerkmale Risse, Baumkante, Verfärbungen und Insektenfraß wird hier nicht näher eingegangen. An dieser Stelle wird auf DIN 4074-1 [6] verwiesen. Die Programmgrundlage für die Vermessung der Äste war ein lokales 2D-Koordinatensystem auf jeder Seitenfläche des Schnittholzes. Durch eine fest definierte Reihenfolge der unterschiedlichen Seitenflächen und der Zuordnung der Astflächen zu einem Ast konnten die Äste im Schnittholz modelliert werden. Bei der Modellierung eines Astes wurden folgende Parameter am Schnittholz aufgenommen:

- Längskoordinate der Astflächen
- Abstände der Astflächen zur jeweiligen Seite
- minimale und maximale Astdurchmesser
- Orientierung der Äste

Das Programm konnte außerdem die Lage der Markröhre im Schnittholz berücksichtigen. Beim Vorhandensein der Markröhre mussten die Koordinaten der Markröhre eingangs richtig angenommen und hinterlegt werden. Äste mit einem maximalen Astdurchmesser kleiner 5 mm blieben nach DIN 4074-1 Abschnitt 5.1.1 [6] unberücksichtigt. Die erfassten Astparameter wurden in der Datenbank des Programms abgespeichert. Dort erfolgte abschließend auch die Berechnung der verschiedenen Ästigkeiten nach DIN 4074-1 [6] für die Schnittholzarten Brett/Bohle und Kantholz. Die Berechnungsgrundlagen der verschiedenen Sortiermerkmale werden im Folgenden erläutert.

Äste in Kanthölzern

Das Astkriterium Einzelast in Kanthölzern (DEK) berechnet sich nach Gleichung (3.29) [6]. In Abbildung 3-12 sind die Eingangswerte der Gleichung beispielhaft dargestellt.

$$A_{DEK} = \max\left(\frac{d_1}{b}; \frac{d_2}{h}; \frac{d_3}{b}; \frac{d_4}{h}; \right) \quad (3.29)$$

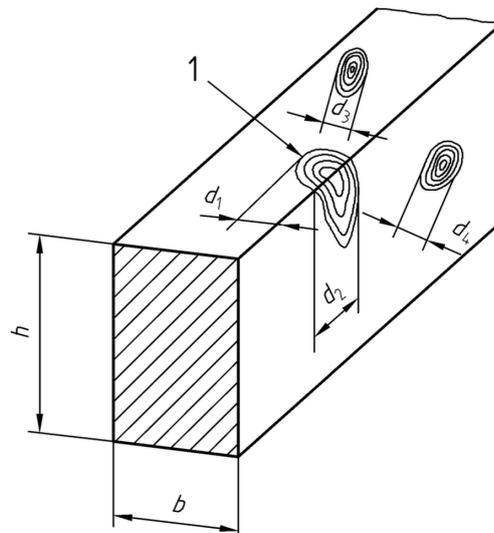


Abbildung 3-12: Astmaße zur Berechnung der Ästigkeit eines Einzelastes in Kanthölzern (DEK) [6]

Äste in Brettern und Bohlen

Nach DIN 4074-1 [6] sind bei der Schnittholzart Brett/Bohle die drei Astkriterien Einzelast (DEB), Astansammlung (DEK) und Schmalseitenast (DSB) zu berücksichtigen. Die Ästigkeit eines Einzelastes berechnet sich nach Gleichung (3.30) [6]. In Abbildung 3-13 sind die Eingangswerte der Gleichung beispielhaft dargestellt.

$$A_{DEB} = \frac{\sum a_i}{2b} \quad (3.30)$$

Bei der Berechnung der Ästigkeit einer Astansammlung werden alle Äste innerhalb einer Messlänge von 150 mm zusammengefasst. Überlappende Astmaße werden dabei nur einfach berücksichtigt. Die Ästigkeit einer Astansammlung berechnet sich nach Gleichung (3.31) [6]. In Abbildung 3-14 sind die Eingangswerte der Gleichung beispielhaft dargestellt.

$$A_{DAB} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7}{2b} \quad (3.31)$$

Bei der Berechnung der Ästigkeit von Schmalseitenästen wird zwischen zwei Fällen unterschieden. Die Ästigkeit eines Schmalseitenastes berechnet sich nach Gleichung (3.32) [6], wohingegen die Ästigkeit von mehreren Schmalseitenästen nach Gleichung (3.33) [6] berechnet wird. In Abbildung 3-15 sind die Eingangswerte der Gleichungen beispielhaft dargestellt.

$$A_{DSB} = \frac{e_1}{b} \quad (3.32)$$

$$A_{DSB} = \frac{e_1 + e_2}{b} \quad (3.33)$$

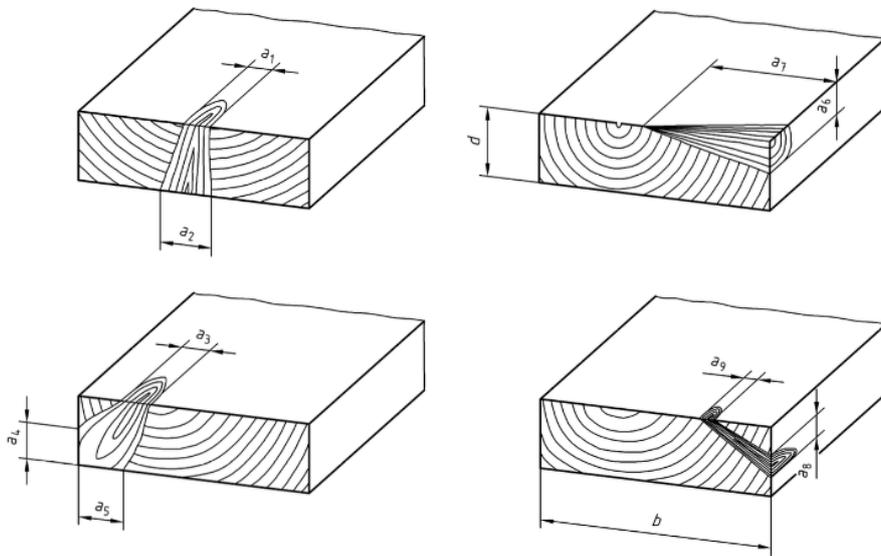


Abbildung 3-13: Astmaße zur Berechnung der Ästigkeit eines Einzelastes in Brettern und Bohlen (DEB) [6]

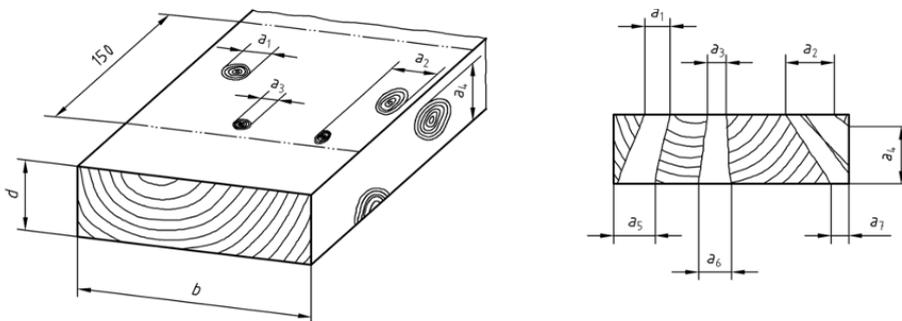


Abbildung 3-14: Astmaße zur Berechnung der Ästigkeit einer Astansammlung in Brettern und Bohlen (DAB) [6]

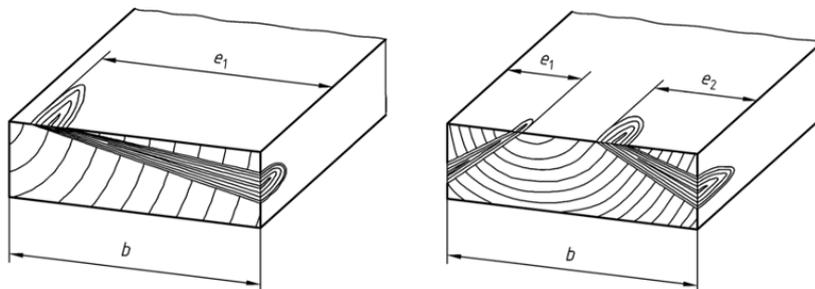


Abbildung 3-15: Astmaße zur Berechnung der Ästigkeit von Schmalseitenästen in Brettern und Bohlen (DSB) [6]

Jahringbreite

Die Bestimmung der mittleren Jahringbreite erfolgte in Anlehnung an DIN 4074-1 [6] an den Darrscheiben der Prüfkörper. Abweichend von dieser Norm wurde jedoch ein Bereich von 25 mm, beginnend von der Markröhre, mitberücksichtigt. Die Jahringzählung begann somit bei der Markröhre, wobei die Markröhre selbst nicht als Jahring gezählt wurde. Bei der Zählung wurden alle auf dem Querschnitt sichtbaren Jahringe miteinbezogen. Da die Messstrecke l immer senkrecht zu den Jahringen verlaufen musste beziehungsweise ein Jahring im Querschnitt nicht an allen Stellen die gleiche Breite aufwies, wurde die Messstrecke teilweise in mehrere Teilstrecken l_i aufgeteilt (siehe Abbildung 3-16). Anschließend wurde die Jahringanzahl pro Teilstrecke gezählt. Die mittlere Jahringbreite berechnet sich somit nach Gleichung (3.34).

$$b_{\text{Jahring}} = \frac{\sum l_i}{\sum n_{\text{Jahringe}}} \quad [\text{mm}] \quad (3.34)$$



Abbildung 3-16: Messstrecken l_i und Jahringanzahl pro Teilstrecke zur Berechnung der mittleren Jahringbreite

Druckholz

Der Druckholzanteil wurde abweichend von DIN 4074-1 [6] nicht an den Seitenflächen des Prüfkörpers, sondern an der Querschnittsfläche der Darrscheibe ermittelt. Um das Druckholz in den einzelnen Jahringzonen besser erkennen zu können, wurde die Darrscheibe eingangs leicht befeuchtet. Anschließend wurde die Druckholzlänge L (siehe Abbildung 3-17), bezogen auf die Prüfkörperhöhe, virtuell aufsummiert und anschließend ins Verhältnis zur Prüfkörperbreite gesetzt. Gleichung (3.35) gibt den Druckholzanteil in Prozent an. Die Prüfkörperhöhe betrug hierbei 45 mm und die Prüfkörperbreite 90mm.

$$\text{Druckholzanteil} = \frac{L}{b} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.35)$$

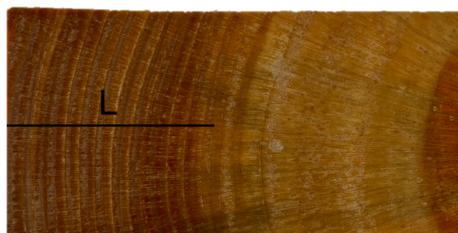


Abbildung 3-17: Druckholzlänge L zur Berechnung des Druckholzanteils

Nicht berücksichtigte Sortiermerkmale

Die Sortiermerkmale Längs- und Querkrümmung und Verdrehung wurden bei der visuellen Sortierung aufgrund der in Kapitel 3.1 beschriebenen Prüfkörperqualität nicht weiter berücksichtigt. Ansonsten wären über 90% der Prüfkörper nach der oben genannten Norm Ausschuss. Da bei dem Sortierkriterium Faserneigung während den Versuchsdurchführungen keine Auffälligkeiten zu verzeichnen waren, wird auf dieses Kriterium hier nicht genauer eingegangen.

Visuelle Sortierregeln nach DIN 4074-1 [6]

Für die visuelle Sortierung des Zugkollektivs wurden die Sortierregeln für Bretter und Bohlen aus Tabelle 3-3 verwendet. Grund hierfür war, dass zwischen den festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften des Zugkollektivs und den Sortiermerkmalen DEB, DAB und DSB eine höhere Korrelation als zu dem Sortiermerkmal DEK nachgewiesen wurde (siehe Tabelle 4-3). Da das Sortiermerkmal Schmalseitenast für Bretter, die zur Herstellung von Brettschichtholzlamellen verwendet werden, nicht eingehalten werden muss, wurde bei der Sortierung zwischen zwei Varianten unterschieden [6]. Nach DIN 4074-1 [6] wird bei der Brettsortierung das oben genannte Sortiermerkmal berücksichtigt, bei der Lamellensortierung bleibt dieses jedoch unberücksichtigt.

Bei der visuellen Sortierung des Biegekollektivs wurden dagegen die Sortierregeln für Kanthölzer aus Tabelle 3-4 angesetzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zwischen dem Sortiermerkmal DEK und den mechanischen und physikalischen Eigenschaften eine höhere Korrelation festgestellt wurde als zu den Sortiermerkmalen DEB, DAB und DSB (siehe Tabelle 4-6).

Nach der visuellen Sortierung der Prüfkörper wurden die charakteristischen Kennwerte der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften der Sortierklassen nach Kapitel 3.4 bestimmt. Anschließend wurde eine Einordnung in die Festigkeitsklassen nach Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 vorgenommen.

Tabelle 3-3: Sortierregeln für Bretter und Bohlen nach DIN 4074-1 [6], angewendet für die Prüfkörper des Zugkollektivs

Sortiermerkmale	Sortierklassen		
	S 7	S 10	S 13
1. Äste			
— Einzelast	bis 1/2	bis 1/3	bis 1/5
— Astansammlung	bis 2/3	bis 1/2	bis 1/3
— Schmalseitenast ^a	—	bis 2/3	bis 1/3
2. Faserneigung	bis 16 %	bis 12 %	bis 7 %
3. Markröhre	zulässig	zulässig	nicht zulässig
4. Jahrringbreite			
— im Allgemeinen	bis 6 mm	bis 6 mm	bis 4 mm
— bei Douglasie	bis 8 mm	bis 8 mm	bis 6 mm
5. Risse			
— Schwindrisse ^b	zulässig	zulässig	zulässig
— Blitzrisse Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
6. Baumkante	bis 1/3	bis 1/3	bis 1/4
7. Krümmung ^b			
— Längskrümmung	bis 12 mm	bis 8 mm	bis 8 mm
— Verdrehung	2 mm / 25 mm Breite	1 mm / 25 mm Breite	1 mm / 25 mm Breite
— Querkrümmung	bis 1/20	bis 1/30	bis 1/50
8. Verfärbungen, Fäule			
— Bläue	zulässig	zulässig	zulässig
— nagelfeste braune und rote Streifen	bis 3/5	bis 2/5	bis 1/5
— Braunfäule Weißfäule	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
9. Druckholz	bis 3/5	bis 2/5	bis 1/5
10. Insektenfraß durch Frischholz-insekten	Fraßgänge bis 2 mm Durchmesser: zulässig		
11. sonstige Merkmale	sind in Anlehnung an die übrigen Sortiermerkmale sinngemäß zu berücksichtigen		
^a Dieses Sortiermerkmal gilt nicht für Bretter für Brettschichtholz. ^b Diese Sortiermerkmale bleiben bei nicht trockensortierten Hölzern unberücksichtigt.			

Tabelle 3-4: Sortierregeln für Kanthölzer nach DIN 4074-1 [6], angewendet für die Prüfkörper des Biegekollektivs

Sortiermerkmale	Sortierklasse		
	S 7, S 7K	S 10, S 10K	S 13, S 13K
1. Äste	bis 3/5	bis 2/5	bis 1/5
2. Faserneigung	bis 12 %	bis 12 %	bis 7 %
3. Markröhre	zulässig	zulässig	nicht zulässig ^a
4. Jahrringbreite			
— im Allgemeinen	bis 6 mm	bis 6 mm	bis 4 mm
— bei Douglasie	bis 8 mm	bis 8 mm	bis 6 mm
5. Risse			
— Schwindrisse ^b	bis 1/2	bis 1/2	bis 2/5
— Blitzrisse Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
6. Baumkante	bis 1/4	bis 1/4	bis 1/5
7. Krümmung ^b			
— Längskrümmung	bis 8 mm	bis 8 mm	bis 8 mm
— Verdrehung	1 mm / 25 mm Höhe	1 mm / 25 mm Höhe	1 mm / 25 mm Höhe
8. Verfärbungen, Fäule			
— Bläue	zulässig	zulässig	zulässig
— nagelfeste braune und rote Streifen	bis 2/5	bis 2/5	bis 1/5
— Braunfäule, Weißfäule	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
9. Druckholz	bis 2/5	bis 2/5	bis 1/5
10. Insektenfraß durch Frischholz-Insekten	Fraßgänge bis 2 mm Durchmesser: zulässig		
11. sonstige Merkmale	sind in Anlehnung an die übrigen Sortiermerkmale sinngemäß zu berücksichtigen		
^a Bei Kantholz mit einer Breite > 120 mm zulässig.			
^b Diese Sortiermerkmale bleiben bei nicht trocken sortierten Hölzern unberücksichtigt.			

Herleitung optimierter visueller Sortierregeln

Wie aus Kapitel 5.2 und Kapitel 6.2 hervorgeht, konnten die visuellen Sortierklassen keiner Festigkeitsklasse nach EN 338 [4] zugeordnet werden. Bei der Zuordnung in die Festigkeitsklassen wirkte vor allem die charakteristische Zug- und Biegefestigkeit der Sortierklassen limitierend. Aufgrund dessen wurde ein Vorschlag zu optimierten visuellen Sortierregeln erarbeitet. Die Optimierung der Sortierregeln für beide Kollektive erfolgte in Anlehnung an die Sortierklasse S7+ aus DIN 4074-1 [6]. Da die mittlere Jahrringbreite der Prüfkörper bei der vorangegangenen visuellen Sortierung bisher unberücksichtigt blieb, wurde dieses Sortiermerkmal bei der Ermittlung der optimierten Sortierregeln zusätzlich mit aufgenommen. Somit wurden für die folgenden Sortiermerkmale neue Grenzwerte festgelegt:

- Zugkollektiv: Einzelast, Astansammlung und Jahrringbreite (Lamellensortierung)
- Biegekollektiv: Einzelast und Jahrringbreite

Zur Festlegung der neuen Grenzwerte wurde ein Algorithmus formuliert, der wie folgt arbeitete: Durch zunächst ausgewählte Grenzwerte wurden die Prüfkörper einer neu definierten Sortierklasse zugeordnet. Ein Prüfkörper wurde dabei nur in eine Sortierklasse eingeordnet, wenn alle Grenzwerte erfüllt wurden. Der Algorithmus berechnete anschließend die charakteristischen Werte der neuen Sortierklassen nach Kapitel 3.4 und ordnete die Sortierklassen einer entsprechenden Festigkeitsklasse nach EN 338 [4] zu. Die Wahl der Grenzwerte erfolgte dabei in folgenden Abstufungen:

- Astkriterien: in einer Schrittweite von 0,1
- Jahrringbreite: in einer Schrittweite von 2,0 mm

Somit ergaben sich für das Zugkollektiv insgesamt 1872 untersuchte Grenzwertkombinationen. Beim Biegekollektiv wurden hingegen nur 117 Grenzwertkombinationen analysiert, da hier ein Sortiermerkmal weniger berücksichtigt wurde. Dies war begründet durch die Sortierung des Schnittholzes nach den Sortierregeln für Kanthölzer nach Tabelle 2 der DIN 4074-1 [6].

Zur übersichtlichen Darstellung werden in Kapitel 5.2.2 und 6.2.2 nur ausgewählte Grenzwertkombinationen dargestellt. Die Beurteilung, welche Grenzwertkombination sich am besten für die Sortierung eignet, erfolgte anhand der größtmöglichen Ausbeute der Sortierklasse in der höchstmöglichen Festigkeitsklasse.

3.7 Maschinelle Sortierung

Dynamisches E-Modul

Die Ermittlung des dynamischen E-Moduls der 200 Prüfkörper des Zug- und Biegekollektivs erfolgte am 25.09.2023 bei der Firma MiCROTEC® in Brixen, Italien. Aufgrund der dort dokumentierten starken Holzfeuchteschwankungen wurde am 24.10.2023 eine erneute Messung an der HFM durchgeführt, um die Daten der Firma MiCROTEC® zu überprüfen und zu validieren. Der dynamische E-Modul bildet, wie schon in Kapitel 3.1 beschrieben, die Grundlage für die Prüfkörpereinteilung in die Kollektive sowie der maschinellen Sortierung. Bei beiden Messvorgängen wurde der dynamische E-Modul E_{dyn} über ein Längsschwingungsverfahren nach Gleichung (3.36) [57] ermittelt.

$$E_{dyn} = 4 \cdot f_{freq}^2 \cdot l^2 \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.36)$$

f_{freq}	[Hz]	Eigenfrequenz
l	[m]	Länge des Prüfkörpers
ρ	[kg/m ³]	Rohdichte der dynamischen Messung

Dafür wurden zuerst die Querschnittsdimensionen, das Gewicht und die Eigenfrequenz der Prüfkörper erfasst. Anschließend wurde die Holzfeuchte der Prüfkörper bestimmt, um den dynamischen E-Modul an die Bezugsholzfeuchte von 12% aus EN 384 [30] anzupassen. Die Querschnittsdimensionen wurden dabei mit einem digitalen Messschieber auf hundertstel Millimeter genau bestimmt. Bei der Versuchsdurchführung wurde darauf geachtet, dass die Prüfkörper möglichst dämpfungsarm gelagert wurden. Durch Anregung mithilfe eines Hammers wurden die Prüfkörper in eine freie Längsschwingung versetzt. Über eine anschließende Frequenzanalyse wurde die erste Eigenfrequenz f_{freq} , die sogenannte Resonanzfrequenz, ermittelt. Bei der Firma MiCROTEC® wurde die Eigenfrequenz mithilfe eines optischen Laserinterferometers namens *Viscan Strenight Grader* bestimmt. Bei diesem Prüfgerät wird die Eigenfrequenz über einen Hochleitungs-Laservibrometer gemessen [58]. An der HFM wurde die Schwingung hingegen über einen an der Stirnseite verankerten Beschleunigungsaufnehmer und ein Mikrofon erfasst. Die Frequenzanalyse erfolgte durch ein laboreigenes Prüfgerät der HFM. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-18 dargestellt. Die Holzfeuchte u_{dyn} wurde mithilfe eines elektronischen Holzfeuchtemessgeräts einschließlich Einschlagsonde gemessen. Das Messgerät berechnete dabei die Holzfeuchte über den elektronischen Widerstand auf eine Nachkommastelle genau.

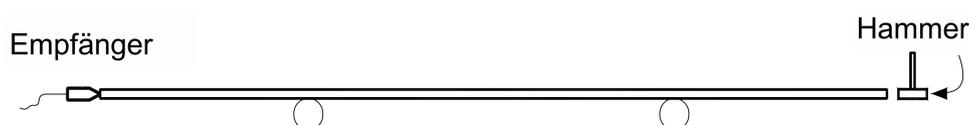


Abbildung 3-18: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus für die Eigenfrequenzmessung des dynamischen E-Moduls [24]

Herleitung der Maschineneinstellungen

Die maschinelle Festigkeitssortierung wurde in Anlehnung an EN 14081-2 [5] durchgeführt. Die Herleitung der Maschineneinstellungen erfolgte dabei nach dem in Abschnitt 6 erläuterten maschinenkontrollierten Verfahren der oben genannten Norm. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl von nur rund 100 Prüfkörpern je Kollektiv konnte die erforderliche Mindestanzahl an Probestücken für die Herleitung der Einstellungen nicht immer eingehalten werden. Außerdem wurden die Kriterien nach EN 14081-1 Tabelle 1 [28] bezüglich der maximalen Krümmung nicht erfüllt. Die Sortierung erfolgte hier, ebenfalls wie schon bei der optimalen und visuellen Sortierung, nach den festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften. Die charakteristischen Werte der einzelnen Stichproben wurden nach Kapitel 3.4 berechnet, wobei für die E-Module ein einfaches Mittel angesetzt wurde.

Im Rahmen der maschinellen Sortierung wurden insgesamt drei unterschiedliche Maschinensysteme (IP) untersucht. Das erste System (IP_1) stellte den dynamischen E-Modul auf Grundlage der individuellen Rohdichte von jedem Prüfkörper dar (siehe Gleichung (3.37)). Das zweite System (IP_2) berechnete den dynamischen E-Modul dagegen anhand der durchschnittlichen Dichte des gesamten Kollektivs aus früheren Prüfungen (siehe Gleichung (3.38)). Bei diesem Maschinensystem wird die Frequenz des dynamischen E-Moduls dargestellt. Somit konnte hier auf die Gewichtsermittlung der Prüfkörper verzichtet werden. Das dritte System (IP_3) basierte lediglich auf der Rohdichte eines Prüfkörpers (siehe Gleichung (3.39)). Die Berechnung der IP -Werte erfolgte auf Grundlage der Messergebnisse aus der Ermittlung des dynamischen E-Moduls. Alle IP -Werte wurden dabei auf eine Holzfeuchte von 12% nach Kapitel 3.2 angepasst. Die Formeln der unterschiedlichen Maschinensysteme werden im Folgenden aufgelistet:

$$IP_1 = E_{dyn,12,i} = 4 \cdot f_{freq}^2 \cdot l^2 \cdot \rho_i \quad \left[\frac{kN}{mm^2} \right] \quad (3.37)$$

$$IP_2 = E_{dyn,12,mean} = 4 \cdot f_{freq}^2 \cdot l^2 \cdot \rho_{mean} \quad \left[\frac{kN}{mm^2} \right] \quad (3.38)$$

$$IP_3 = \rho_{12} = \frac{m}{l \cdot b \cdot d} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.39)$$

Die Methode zur Herleitung der Maschineneinstellungen veranschaulicht Abbildung 3-19. Grundsätzlich wurde die untere Grenze eines Maschinensystems durch das Aussortieren der Prüfkörper mit den fünf niedrigsten IP -Werten je gewünschter Sortierklasse bestimmt. Die obere Grenze wurde festgelegt, indem die festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften in Abhängigkeit der IP -Werte absteigend angeordnet wurden. Daraufhin wurde bei der Berechnung der charakteristischen Werte jeweils ein Prüfkörper nach dem anderen aus der Berechnung ausgeschlossen, angefangen mit demjenigen, der den geringsten IP -Wert aufwies. Dieser Iterationsschritt wurde so oft wiederholt, bis die erforderlichen Grenzwerte der gewünschten Festigkeitsklasse aus Tabelle 3-1 beziehungsweise Tabelle 3-2 erreicht wurden. Bei der Sortierung in die höheren Festigkeitsklassen, wurden die aussortierten Prüfkörper in eine niedrigere Festigkeitsklasse eingeordnet. Somit ergaben sich, wie auch schon bei der optimalen Sortierung, unterschiedliche Festigkeitsklassenkombinationen.

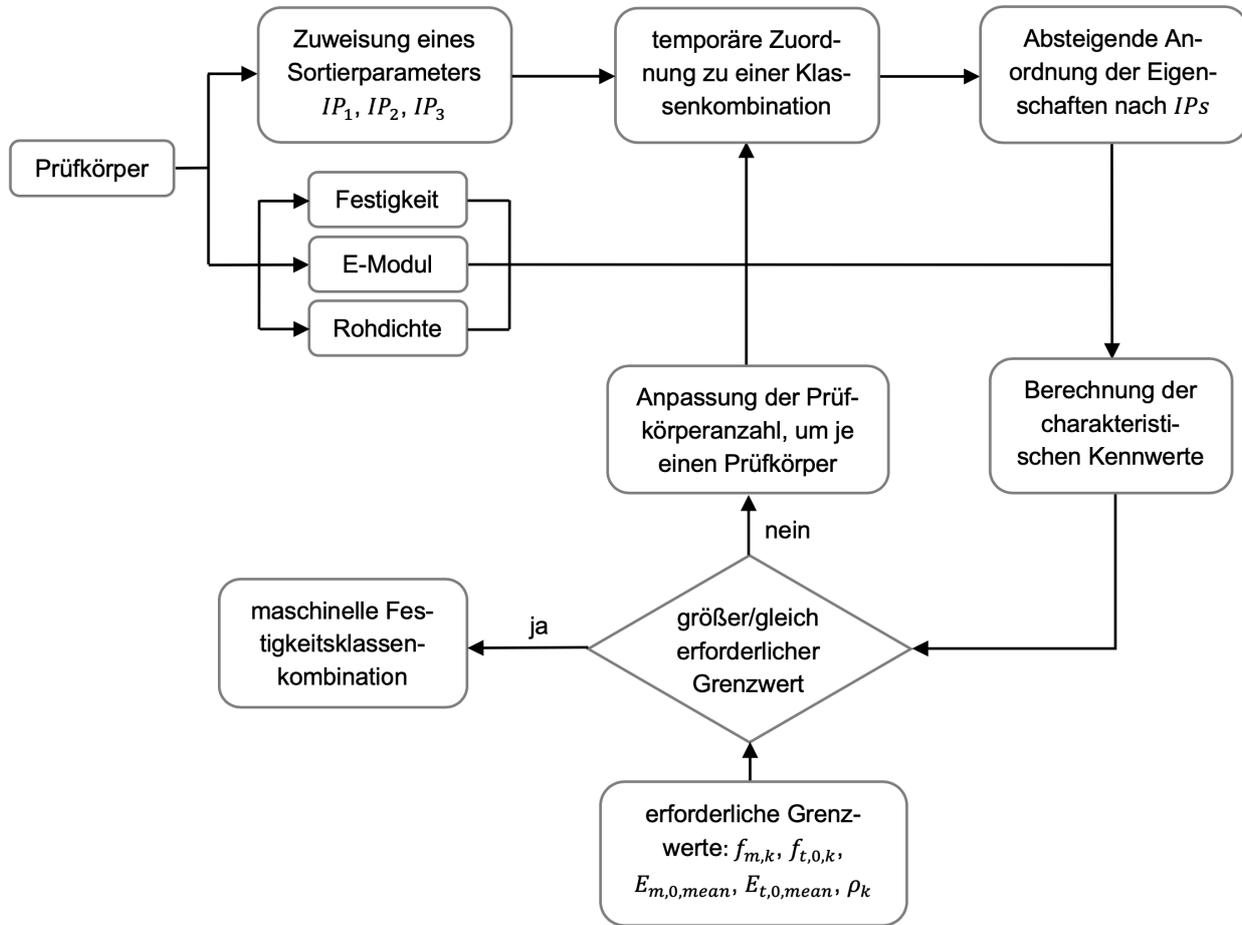


Abbildung 3-19: Flussdiagramm zur Herleitung der Maschineneinstellungen im Rahmen der maschinellen Sortierung

Ausschuss der Proben aus der maschinellen Sortierung

Die Prüfkörper mit den Nummern 158, 167 und 173 wurden bei der maschinellen Sortierung aus der Auswertung ausgeschlossen. Grund hierfür waren die hohen Ästigkeiten beziehungsweise Wachstumsfehler im Holz der Prüfkörper. Sie erfüllten nicht die Anforderungen an die zusätzliche visuelle Kontrolle von unvollständig erfassten Bereichen bei der maschinellen Sortierung nach Tabelle 2 der EN 14081-1 [28]. Abbildung 3-20 zeigt die Fehlstellen der oben genannten Prüfkörper.

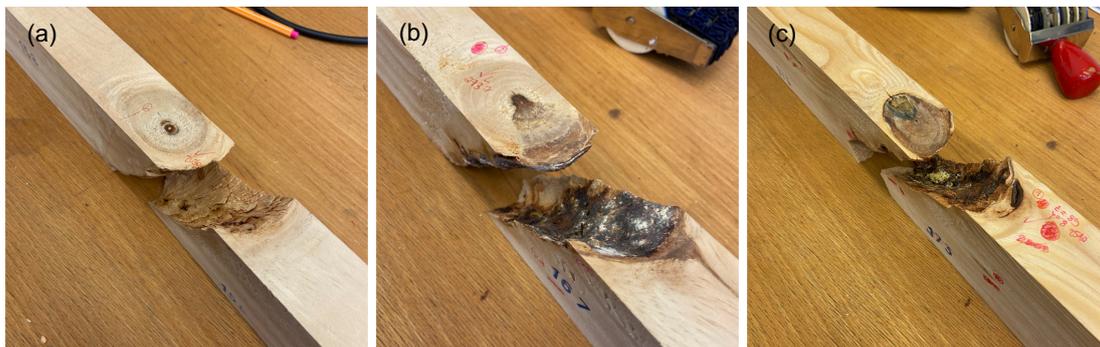


Abbildung 3-20: Ausschuss der Proben aus der maschinellen Sortierung; (a) PK 158, (b) PK 167, (c) PK 173

3.8 Kombinierte maschinelle und visuelle Sortierung

Um die Ausbeuten in den jeweiligen Festigkeitsklassen weiter optimieren zu können, wurden aufgrund der Erkenntnisse aus den vorherigen Sortiermethoden neue Grenzwerte für eine Kombination aus maschinell und visuell erfassbaren Sortierparametern formuliert. Da, wie schon Augustin [19] berichtet, eine Kombination von mehreren Parametern nur bis zu einer beschränkten Anzahl sinnvoll ist, wurden maximal drei Sortierparameter miteinander kombiniert. Dabei wurde sich auf eine Kombination der visuellen Sortiermerkmale mit IP_1 beschränkt, da dieser Sortierparameter bessere Sortierergebnisse in der maschinellen Sortierung hinsichtlich Ausbeute und Festigkeitsklassen im Zugkollektiv erzielte als der Sortierparameter IP_2 . Zusätzlich erfolgte eine weitere Kombination der visuellen Sortiermerkmale mit der Rohdichte, also IP_3 . Beide maschinellen Sortierparameter wurden, wie auch schon in Kapitel 3.7, an eine Holzfeuchte von 12% nach Kapitel 3.2 angepasst. Die verwendeten Sortiermerkmale je Kollektiv werden im Folgenden aufgezählt:

- Zugkollektiv (Lamellensortierung):
 - > Einzelast, Astansammlung und IP_1
 - > Einzelast, Astansammlung und IP_3
- Biegekollektiv:
 - > Einzelast und IP_1
 - > Einzelast und IP_3

Für die Bestimmung der neuen Grenzwerte wurde ein ähnlicher Algorithmus wie in Kapitel 3.6 formuliert. Auch hier wurde ein Prüfkörper nur dann in eine Sortierklasse eingeordnet, wenn alle Grenzwerte erfüllt wurden. Anschließend berechnete der Algorithmus die charakteristischen Werte der neu definierten Sortierklassen nach Kapitel 3.4. Anhand der berechneten charakteristischen Grenzwerte wurden die Sortierklassen in eine Festigkeitsklasse nach EN 338 [4] eingeteilt. Die Grenzwerte wurden dabei in folgenden Schrittweiten analysiert:

- Astkriterien: in Schrittweiten von 0,1
- dynamische E-Module (IP_1): in Schrittweiten von 1,0 kN/mm²
- Rohdichten (IP_3): in Schrittweiten von 50 kg/m³

Daraus ergaben sich beim Zugkollektiv in Summe 1078 zu untersuchende Grenzwertkombinationen. Da die Analyse des Biegekollektivs ein Sortiermerkmal weniger berücksichtigte, lag die untersuchte Anzahl an Grenzwertkombinationen hier bei nur 207. Außerdem wurden beim Zugkollektiv dieselben Prüfkörper wie bei der maschinellen Sortierung aus der Analyse ausgeschlossen (siehe Abbildung 3-20).

Ähnlich wie bei der Bestimmung der optimierten visuellen Sortierregeln werden in Kapitel 5.4 und 6.4 nur ausgewählte Grenzwertkombinationen aufgeführt. Es werden vor allem die Grenzwertkombinationen der höchsten Festigkeitsklasse mit der größten Ausbeute dargestellt.

3.9 Vergleich der Festigkeitsprofile aus Zug- und Biegefestigkeit

Für den Vergleich der Festigkeitsprofile wurden die Ergebnisse aus den statischen Zug- und Biegeversuchen herangezogen. Das Verhältnis der Festigkeiten $f_{t,0,k}/f_{m,k}$ wurde an insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfkörpern untersucht. Burger et al. [59] wies bereits 1977 darauf hin, dass das Verhältnis von Zug- zu Biegefestigkeit von der Holzqualität abhängig ist. Infolgedessen wurden für den Vergleich der Festigkeitsprofile zwei verschiedene Ansätze untersucht. Zum einen wurden die Prüfkörper mittels einer idealen Sortiermaschine nach ihrer Festigkeit sortiert, zum anderen erfolgte die Sortierung basierend auf ausgewählten visuellen und maschinellen Sortierparametern.

Bei der idealen Sortierung wurden die Prüfkörper in etwa drei gleichgroße Datengruppen ($n \approx 30$) unterteilt. Unter Verwendung von neuen Grenzwerten für die Sortierparameter aus der maschinellen Sortierung – IP_1 , IP_2 und IP_3 – wurden die Zug- und Biegedatensätze in Teilmengen sortiert, um Gruppen mit gleichwertiger Qualität zu bilden. Um den Anforderungen aus EN 14081-2 Abschnitt 6.4.1 [5] bezüglich der Berechnung der charakteristischen Werte gerecht zu werden, wurden die Grenzwerte für die Sortierparameter dabei so gewählt, dass die Prüfkörperanzahl in den Teilmengen größer 20 betrug. Aufgrund der erforderlichen Mindestanzahl konnten daher keine sinnvollen Grenzwerte für die kombinierte visuelle und maschinelle Sortierung ermittelt werden. Stattdessen wurde das Sortierkriterium DEK aus der visuellen Sortierung herangezogen. Auf Basis der neuen Grenzwerte für die Sortierparameter wurden anschließend die charakteristischen Festigkeitswerte der Teilmengen nach Kapitel 3.4 berechnet. Tabelle 3-5 zeigt die ausgewählten Grenzwerte der visuellen und maschinellen Sortierparameter.

Tabelle 3-5: Grenzwerte für die Sortierparameter DEK, IP_1 , IP_2 und IP_3 für den Vergleich der Festigkeitsprofile, um Gruppen mit gleichwertiger Qualität zu bilden. Mindestanzahl je Gruppe größer 20.

DEK	$0,364 > DEK$	$0,364 \leq DEK < 0,488$	$0,488 \leq DEK$
IP_1	$6,9 > IP_1$	$6,9 \leq IP_1 < 9,9$	$9,9 \leq IP_1$
IP_2	$7,5 > IP_2$	$7,5 \leq IP_2 < 9,2$	$9,2 \leq IP_2$
IP_3	$418 > IP_3$	$418 \leq IP_3 < 480$	$480 \leq IP_3$

Im Rahmen des Vergleichs wurden außerdem Formeln zur Umrechnung von charakteristischer Biegefestigkeit in charakteristische Zugfestigkeit und umgekehrt mithilfe von linearen Regressionsanalysen der unterschiedlichen Datengruppen ermittelt. Dabei wird in Kapitel 7 jedoch nur genauer auf die Umrechnung der mittels ausgewählten Sortierparametern eingeteilten Datengruppen eingegangen. Des Weiteren wurden die berechneten charakteristischen Werte mit dem Umrechnungsvorschlag aus EN 384 [30] verglichen. In Abschnitt 7 der EN 384 [30] sind folgende Gleichungen zur Umrechnung der Festigkeitswerte vorgegeben:

$$f_{t,0,k} = -3,07 + 0,73 \cdot f_{m,k} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.40)$$

$$f_{m,k} = 3,66 + 1,213 \cdot f_{t,0,k} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.41)$$

4 Ergebnisse

4.1 Zugversuche nach EN 408 [3]

Mechanische und physikalische Eigenschaften sowie Ästigkeiten des Vollholzes

Die zusammenfassende deskriptive Statistik – Mittelwert, Variationskoeffizient (VK) und 5%-Quantil nach Kapitel 3.4 – der mechanischen und physikalischen Eigenschaften von tansanischem Kiefernholz (*Pinus patula*) ist in Tabelle 4-1 dargestellt. Die Tabelle zeigt außerdem die Eigenfrequenz und Holzfeuchten sowie die Sortiermerkmale DEB und DAB.

Tabelle 4-1: Statistische Kennwerte (Mittelwert, Variationskoeffizient (VK), 5%-Quantil) der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie Ästigkeiten des unsortierten Zugkollektivs, n = 90

	$f_{t,0}$ N/mm ²	$E_{t,12}$ kN/mm ²	$\rho_{t,12}$ kg/m ³	$E_{t,dyn,12}$ kN/mm ²	$f_{t,freq}$ Hz	$u_{t,stat}$ %	$u_{t,dyn}$ %	DEB	DAB
Mittelwert	14,1	7,4	435	8,6	532	9,8	11,0	0,27	0,46
VK [%]	47,3	38,2	18,9	35,5	11,4	3,1	5,4	63,8	39,3
5%-Quantil	4,8*	2,3**	288**	-	-	-	-	-	-

* Log-Normalverteilung; ** Normalverteilung

Die mittlere Zugfestigkeit in Faserrichtung $f_{t,0}$ liegt bei 14,1 N/mm² und die mittlere Rohdichte $\rho_{t,12}$ bei 435 kg/m³. Der mittlere Zug-E-Modul $E_{t,12}$ aus der statischen Messung beträgt 7,4 kN/mm². Im Vergleich dazu liegt der mittlere E-Modul aus der dynamischen Messung $E_{t,dyn,12}$ bei 8,6 kN/mm². Die mittleren Holzfeuchten aus der statischen und dynamischen Messung sind mit jeweils 9,8% und 11,0% etwa vergleichbar. Die Mittelwerte der Sortiermerkmale betragen 0,27 für das Sortiermerkmal DEB und 0,46 für das Sortiermerkmal DAB.

Angesichts der niedrigen charakteristischen Kennwerte kann die unsortierte Grundgesamtheit des Zugkollektivs keiner Festigkeitsklasse nach EN 338 [4] zugeordnet werden. Das 5%-Quantil der Zugfestigkeit $f_{t,k}$ liegt zum Beispiel nur bei 4,8 N/mm². Der charakteristische Mittelwert des Zug-E-Moduls $E_{t,0,mean}$ liegt dagegen bei 7,2 kN/mm² und das 5%-Quantil der Rohdichte $\rho_{t,k}$ bei 288 kg/m³. Das 5%-Quantil des Zug-E-Moduls $E_{t,0,k}$ beträgt 2,3 kN/mm².

Die Streuung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften und Ästigkeiten ist unterschiedlich. Die Zugfestigkeit weist eine hohe Streuung mit einem VK von 47,3% auf. Die Steifigkeit mit einem VK von 38,2% streut im Vergleich zur Zugfestigkeit weniger. Die niedrigste Streuung weist die Rohdichte mit einem VK von 18,9% auf. Für die Holzfeuchten während der dynamischen und statischen Messung ist die Streuung gering ausgeprägt. Im Vergleich zum Sortiermerkmal DAB (VK = 39,9%) streut das Sortiermerkmal DEB mit einem VK von 63,8% deutlich mehr.

Verteilungen der mechanischen und physikalischen Eigenschaften

Die Wahrscheinlichkeitsdichten sowie die kumulierten Häufigkeiten der mechanischen und physikalischen Eigenschaften aus der statischen Messung sind in Abbildung 4-1 (a) bis (c) dargestellt. Für die Darstellung in den Histogrammen werden die Messergebnisse nach Gleichung (3.18) in insgesamt 10 Ränge eingeteilt.

Durch die in Abbildung 4-1 aufgeführten kumulierten Häufigkeiten werden grundsätzlich die empfohlenen Verteilungen für die verschiedenen Eigenschaften sowohl aus EN 14358 [56], als auch aus zahlreichen Forschungsarbeiten bestätigt. Durch die Log-Normalverteilung wird die tatsächliche Verteilung der Zugfestigkeit im Bereich des 5%-Quantils aus Tabelle 4-1 unterschätzt. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Bemessung der Tragfähigkeit eines Tragwerks aus. Im Vergleich dazu überschätzt die Normalverteilung die tatsächliche Verteilung der Zugfestigkeit im Bereich des 5%-Quantils. Der Unterschied von Log-Normalverteilung zu Normalverteilung hinsichtlich des „*Best-Fitting Models*“ ist im Bereich der 5%-Quantile der Steifigkeit und Rohdichte nur marginal. Deshalb wird zur Beschreibung der empirischen Verteilung der Steifigkeit und Rohdichte in Abbildung 4-1 (b) und (c) der Empfehlung aus der Literatur bezüglich der Normalverteilung Folge geleistet.

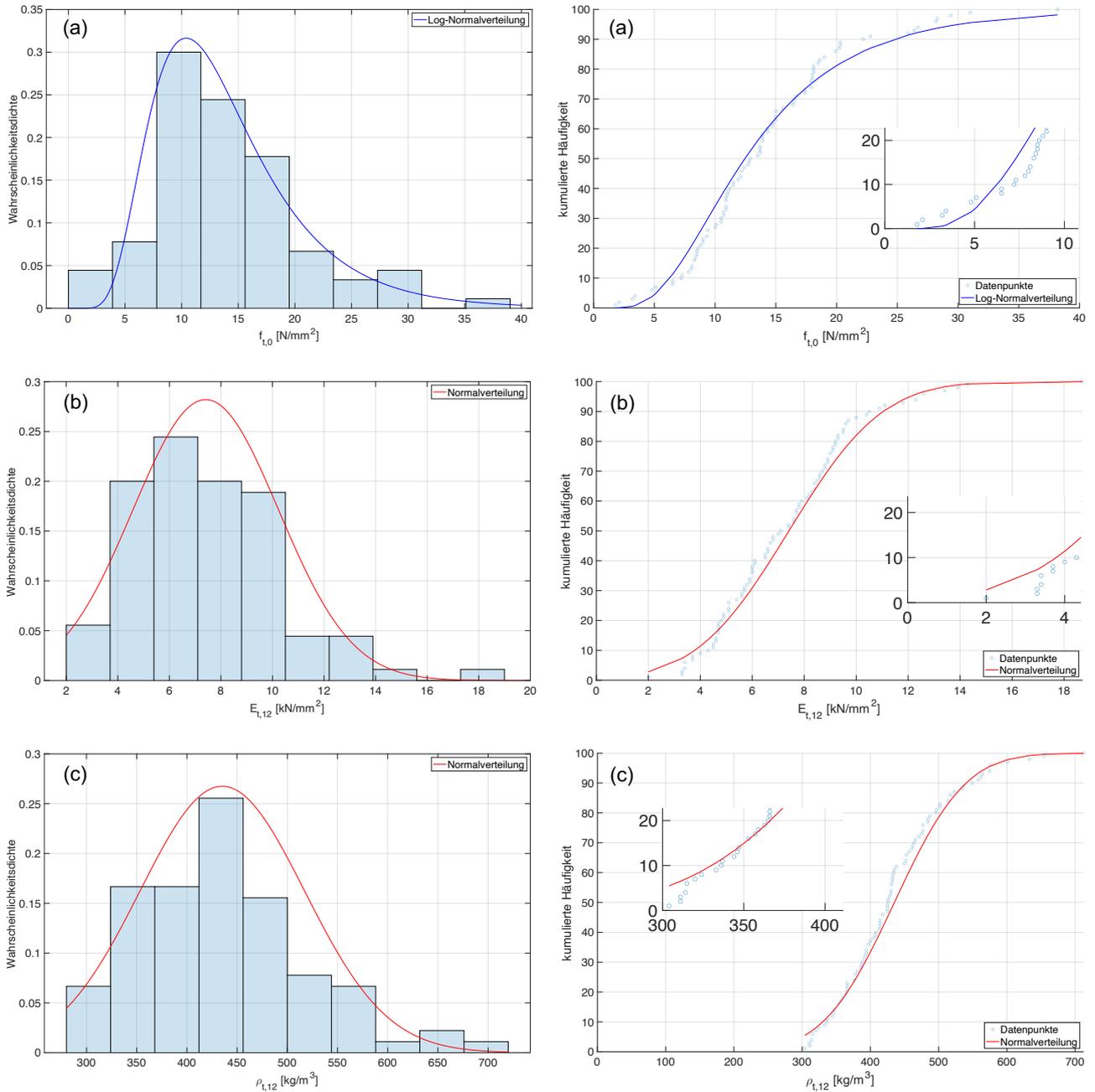


Abbildung 4-1: Wahrscheinlichkeitsdichten und kumulierte Häufigkeiten der statischen Messergebnisse des Zugkollektivs; (a) Zugfestigkeit in N/mm²; (b) Zug-E-Modul in kN/mm²; (c) Rohdichte in kg/m³; n = 90

Versagensarten des Vollholzes

Die häufigsten Versagensarten im Zugversuch sind (siehe Tabelle 4-2) Kurzfaserverbrüche. Im Vergleich dazu gibt es insgesamt nur zwei Langfaserverbrüche. Die Seitenansicht eines Kurzfaserverbruchs aufgrund eines Astes ist in Abbildung 4-2 dargestellt. In Abbildung 4-3 ist ein Kurzfaserverbruch ohne Ast zu sehen. Weitere Bilder der Versagensarten, wie zum Beispiel Kurzfaserverbrüche aufgrund von Rindeneinwüchsen oder Wipfelbrüchen zeigen die Abbildungen A-1 und A-2 in Anhang A. Von den insgesamt 90 untersuchten Prüfkörpern sind 6 Stück im Einspannbereich gebrochen und 11 Stück wiesen eine Markröhre an der Bruchstelle auf.

Tabelle 4-2: Übersicht der Versagensarten der Vollholzproben im Rahmen der Zugprüfung, n = 90

Angaben zum Bruch	Anzahl
Kurzfaserverbruch - mit Ast	71
Kurzfaserverbruch - ohne Ast	13
Kurzfaserverbruch - Rindeneinwuchs	1
Kurzfaserverbruch - Wipfelbruch	3
Langfaserverbruch - mit Ast	2



Abbildung 4-2: Bruchbild eines Kurzfaserverbruchs mit Ast im Rahmen der Zugprüfung, Vollholzprobe



Abbildung 4-3: Bruchbild eines Kurzfaserverbruchs ohne Ast im Rahmen der Zugprüfung, Vollholzprobe

Korrelationen

In Tabelle 4-3 sind Korrelationen der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie der zerstörungsfrei messbaren Eigenschaften dargestellt. Der Zusammenhang einzelner Werte wird hier durch den Korrelationskoeffizienten nach Pearson dargestellt. Die Diagramme zu den linearen Regressionen zwischen den Ergebnissen aus den zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen sind in den Abbildungen A-3 bis A-10 im Anhang A zu finden.

Tabelle 4-3: Korrelationsmatrix der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie Ästigkeiten des Zugkollektivs, Pearson-Korrelationskoeffizient, $n = 90$

	$f_{t,0}$ N/mm ²	$E_{t,12}$ kN/mm ²	$\rho_{t,12}$ kg/m ³	$E_{t,dyn,12}$ kN/mm ²	f_{freq} Hz	DEB –	DAB –	DSB –	DEK –
$f_{t,0}$	1								
$E_{t,12}$	0,82	1							
ρ_{12}	0,69	0,87	1						
$E_{dyn,12}$	0,76	0,96	0,91	1					
f_{freq}	0,70	0,88	0,72	0,91	1				
DEB	0,35	0,30	0,12	0,20	0,30	1			
DAB	0,42	0,40	0,21	0,32	0,40	0,70	1		
DSB	0,08	0,05	0,04	0,05	0,01	0,18	0,05*	1	
DEK	0,30	0,26	0,05	0,17	0,25	0,65	0,59*	0,03*	1

* nicht signifikant $p > 0,01$

Der Korrelationskoeffizient (R) zwischen der Zugfestigkeit und dem Zug-E-Modul beträgt $R = 0,82$. Im Vergleich zur Steifigkeit ist der R -Wert zwischen der Zugfestigkeit und der Rohdichte ($R = 0,69$) niedriger. Der dynamische E-Modul zeigt einen niedrigeren R -Wert zur Zugfestigkeit ($R = 0,76$) als der E-Modul aus der statischen Messung auf. Außerdem weist die Eigenfrequenz eine niedrigere Korrelation zur Zugfestigkeit ($R = 0,70$) auf als beim dynamischen E-Modul.

Der dynamische E-Modul weist grundsätzlich eine hohe Korrelation zu den Parametern aus der statischen Messung auf. Die höchste Korrelation gibt es zwischen dem dynamischen und dem statischen E-Modul ($R = 0,96$). Die Rohdichte zeigt einen höheren R -Wert zum dynamischen E-Modul ($R = 0,91$) als beim E-Modul aus der statischen Messung ($R = 0,87$).

Die Ästigkeitskriterien weisen im Vergleich zu den oben genannten Korrelationen geringere R -Werte auf. Am höchsten korrelieren das Sortiermerkmal DAB und die Zugfestigkeit ($R = 0,42$). Bei dem Sortiermerkmal DEB wird ein höherer R -Wert ($R = 0,35$) erreicht, als bei dem Sortiermerkmal DEK ($R = 0,30$). Aufgrund der beschriebenen Korrelationen wird die visuelle Sortierung in Kapitel 5.2 nach den Sortierregeln für Bretter durchgeführt. Die geringste Korrelation zur Zugfestigkeit wird beim Sortiermerkmal DSB mit einem R -Wert von nur 0,08 festgestellt. Außerdem weisen die Ästikriterien DAB, DSB und DEK keine signifikante Korrelation zueinander auf (p -Wert $> 0,01$).

4.2 Biegeversuche nach EN 408 [3]

4.2.1 Ergebnisse am Vollholz

Mechanische und physikalische Eigenschaften sowie Ästigkeiten des Vollholzes

Eine Gesamtübersicht der deskriptiven Statistik – Mittelwert, Variationskoeffizient (VK) und 5%-Quantil nach Kapitel 3.4 – der mechanischen und physikalischen Eigenschaften von tansanischem Kiefernholz (*Pinus patula*) zeigt Tabelle 4-4. Die Tabelle bietet, ähnlich wie Tabelle 4-1 in Kapitel 4.1, zusätzlich einen Überblick über die Eigenfrequenz und Holzfeuchte sowie über das Sortiermerkmal DEK.

Tabelle 4-4: Statistische Kennwerte (Mittelwert, Variationskoeffizient (VK), 5%-Quantil) der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie Ästigkeiten des unsortierten Biegekollektivs, n = 95

	f_m N/mm ²	$E_{m,l,12}$ kN/mm ²	$E_{m,g,12}$ kN/mm ²	$\rho_{m,12}$ kg/m ³	$E_{m,dyn,12}$ kN/mm ²	$f_{m,freq}$ Hz	$u_{m,stat}$ %	$u_{m,dyn}$ %	DEK –
Mittelwert	25,2	6,9	7,3	427	8,4	529	10,5	11,0	0,48
VK [%]	42,2	36,7	32,9	18,4	34,3	11,6	7,4	6,7	31,2
5%-Quantil	9,7*	2,4**	3,0**	287**	-	-	-	-	-

* Log-Normalverteilung; ** Normalverteilung

Die Mittelwerte der Biegefestigkeit in Faserrichtung f_m und der Rohdichte $\rho_{m,12}$ liegen bei 25,2 N/mm² und 427 kg/m³. Der mittlere lokale Biege-E-Modul $E_{m,l,12}$ aus der statischen Messung beträgt 6,9 kN/mm². Der mittlere globale Biege-E-Modul $E_{m,g,12}$ aus der statischen Messung liegt hingegen bei 7,3 kN/mm². Im Vergleich zu den E-Modulen aus der statischen Messung beträgt der mittlere E-Modul aus der dynamischen Messung $E_{m,dyn,12}$ 8,4 kN/mm². Die mittlere Holzfeuchte aus der statischen und dynamischen Messung ist mit jeweils 10,5% und 11,0% vergleichbar. Der Mittelwert des Sortiermerkmals DEK beträgt 0,48.

Auch bei diesem Kollektiv ist eine Zuordnung der unsortierten Grundgesamtheit in eine Festigkeitsklasse nach EN 338 [4] nicht möglich. Grund hierfür sind die geringen charakteristischen Werte. Das 5%-Quantil der Biegefestigkeit $f_{m,k}$ liegt zum Beispiel bei 9,7 N/mm². Die charakteristischen Mittelwerte der Steifigkeitskennwerte $E_{m,0,mean}$ liegen bei 6,7 kN/mm² für die lokale Messung und bei 7,2 kN/mm² für die globale Messung. Das 5%-Quantil der Rohdichte ρ_k beträgt 287 kg/m³.

Die Streuung der Prüfergebnisse des Biegekollektivs ist vergleichbar mit den Ergebnissen der statischen Messung des Zugkollektivs. Die höchste Streuung weist hier ebenfalls die Festigkeit auf, gefolgt von der Steifigkeit und der Rohdichte. Der VK der Biegefestigkeit liegt bei 42,2%, während die Rohdichte einen VK von 18,4% aufweist. Der VK der beiden Steifigkeitskennwerte beträgt im Mittel 34,8%. Außerdem variieren die Holzfeuchten im dynamischen sowie statischen Versuch ähnlich. Die Streuung des Sortiermerkmals DEK liegt bei 31,2%.

Verteilungen der mechanischen und physikalischen Eigenschaften

Die grafische Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten sowie der kumulierten Häufigkeiten der mechanischen und physikalischen Eigenschaften aus der statischen Messung zeigt Abbildung 4-4 (a) bis (c). Auch hier werden die Messergebnisse in den Histogrammen nach Gleichung (3.18) in 10 Ränge eingeteilt.

Im Allgemeinen lassen sich die empfohlenen Verteilungen sowohl aus EN 14358 [56] als auch aus zahlreichen Forschungsarbeiten durch die kumulierten Häufigkeiten in Abbildung 4-4 bestätigen. Da die Normalverteilung die tatsächliche Verteilung der Biegefestigkeit im Bereich des 5%-Quantils überschätzt, wird in Abbildung 4-4 (a) die Log-Normalverteilung zur Beschreibung der tatsächlichen Verteilung der Biegefestigkeit verwendet. Die Log-Normalverteilung unterschätzt dagegen die tatsächliche Festigkeitsverteilung im Bereich von 0 N/mm^2 bis $9,7 \text{ N/mm}^2$, was sich positiv auf die Bemessung der Tragfähigkeit eines Tragwerks auswirkt. Im Bereich des 5%-Quantils der Steifigkeit – bis $2,4 \text{ N/mm}^2$ – ist der Unterschied hinsichtlich des „*Best-Fitting Models*“ zwischen der Log-Normalverteilung und der Normalverteilung lediglich marginal ausgeprägt. Aus diesem Grund wird der Empfehlung aus der Literatur bezüglich der Normalverteilung zur Beschreibung der Verteilung der Steifigkeit gefolgt. Das gilt auch für die Beschreibung der tatsächlichen Verteilung der Rohdichte (siehe Abbildung 4-4 (c)).

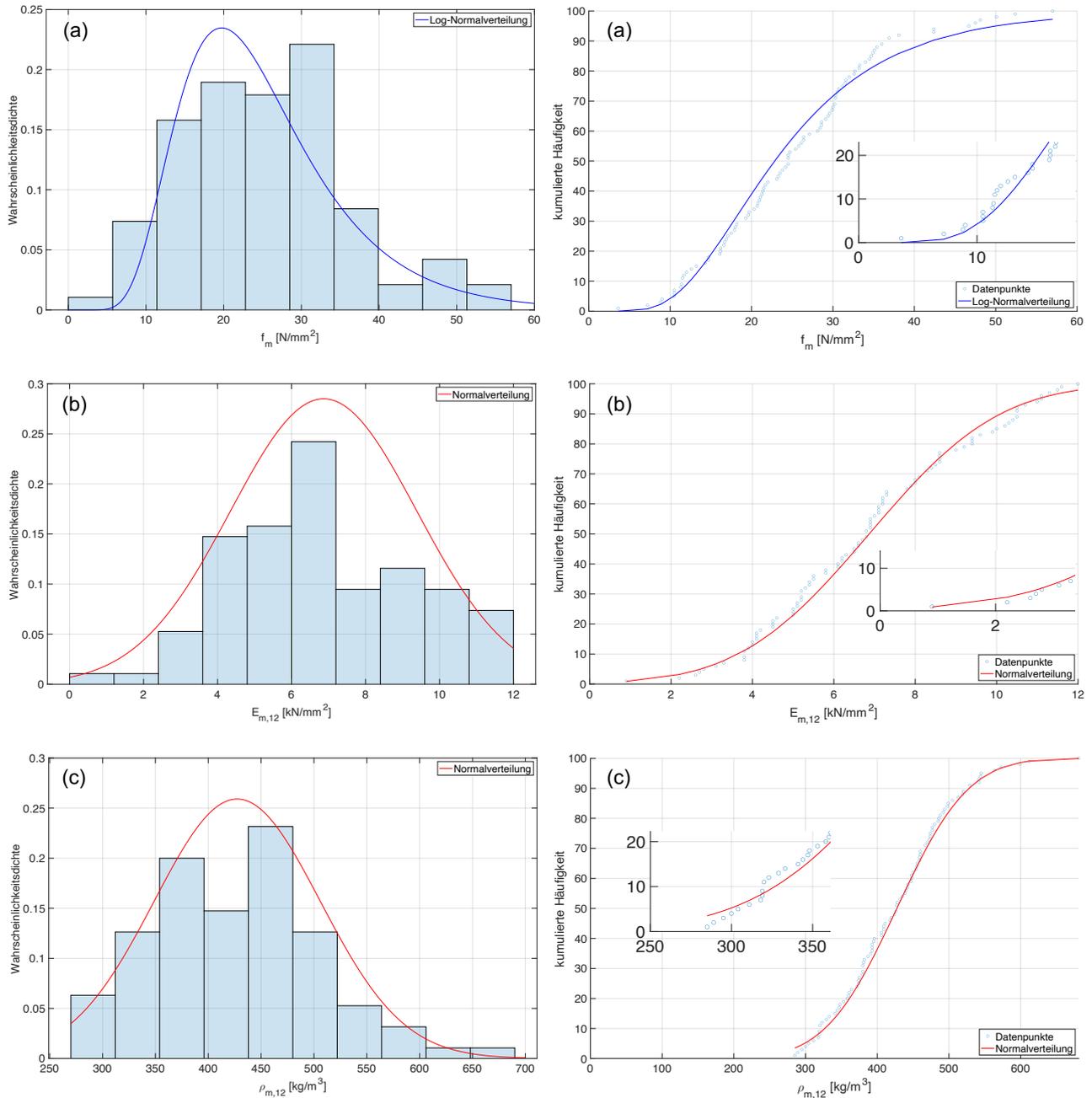


Abbildung 4-4: Wahrscheinlichkeitsdichten und kumulierte Häufigkeiten der statischen Messergebnisse des Biegekollektivs; (a) Biegefestigkeit in N/mm²; (b) lokales Biege-E-Modul in kN/mm²; (c) Rohdichte in kg/m³; n = 95

Versagensarten des Vollholzes

Rund die Hälfte aller Prüfkörper weist ein sprödes Versagen auf. Die häufigsten Versagensarten sind Kurz- und Langfaserbrüche infolge von Holzfehlern. Ein Kurzfaserbruch ohne Ast ist dagegen seltener. Eine Übersicht der Anzahlen der unterschiedlichen Bruchbilder ist in Tabelle 4-5 aufgeführt. Ein Beispiel eines Kurzfaserbruchs aufgrund eines Astes ist in Abbildung 4-5 zu sehen. In Abbildung 4-6 ist ein Langfaserbruch infolge eines Astes abgebildet. Weitere Bruchbilder zeigen die Abbildungen B-1 und B-2 in Anhang B.

Tabelle 4-5: Übersicht der Versagensarten der Vollholzproben im Rahmen der Biegeprüfung, n = 95

Angaben zum Bruch	Anzahl
Kurzfaserbruch - mit Ast	42*
Kurzfaserbruch - ohne Ast	4
Kurzfaserbruch - Rindeneinwuchs	1
Langfaserbruch - mit Ast	44

* davon 3 Brüche außerhalb der Lasteinleitungspunkte

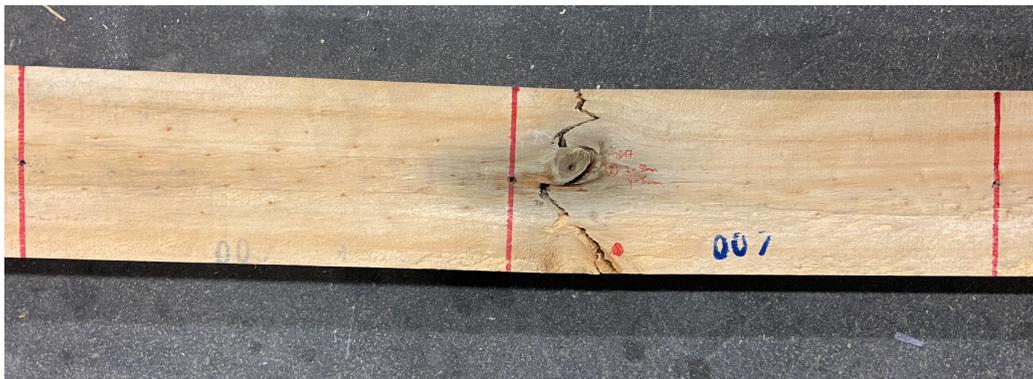


Abbildung 4-5: Bruchbild eines Kurzfaserbruchs mit Ast im Rahmen der Biegeprüfung, Vollholzprobe



Abbildung 4-6: Bruchbild eines Langfaserbruchs mit Ast im Rahmen der Biegeprüfung, Vollholzprobe

Korrelationen

Tabelle 4-6 präsentiert die Korrelationen zwischen den mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie den zerstörungsfrei messbaren Eigenschaften. Die Beziehung zwischen den einzelnen Werten wird hier mittels des Pearson-Korrelationskoeffizienten veranschaulicht. Visuelle Darstellungen der wesentlichen linearen Regressionen sind in den Abbildungen B-3 bis B-9 im Anhang B dargestellt.

Tabelle 4-6: Korrelationsmatrix der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie Ästigkeiten des Biegekollektivs, Pearson-Korrelationskoeffizient, $n = 95$

	f_m N/mm ²	$E_{m,l,12}$ kN/mm ²	$E_{m,g,12}$ kN/mm ²	$\rho_{m,12}$ kg/m ³	$E_{m,dyn,12}$ kN/mm ²	f_{freq} Hz	DEB –	DAB –	DSB –	DEK –
f_m	1									
$E_{m,l,12}$	0,77	1								
$E_{m,g,12}$	0,73	0,95	1							
ρ_{12}	0,53	0,73	0,82	1						
$E_{dyn,12}$	0,58	0,84	0,92	0,87	1					
f_{freq}	0,50	0,78	0,85	0,64	0,91	1				
DEB	0,11	0,00	0,02	0,16	0,15	0,09	1			
DAB	0,23	0,24	0,20	0,13	0,12	0,11	0,41	1		
DSB	0,23	0,28	0,28	0,24	0,27	0,25	0,10	0,29	1	
DEK	0,27	0,19	0,17	0,03	0,06	0,13	0,51	0,36*	0,12*	1

* nicht signifikant $p > 0,01$

Für die Biegefestigkeit und den Biege-E-Modul ergibt sich ein Korrelationskoeffizient (R) von 0,77, während der R -Wert zwischen Biegefestigkeit und Rohdichte mit $R = 0,53$ im Vergleich zur Steifigkeit niedriger ausfällt. Die lokalen und globalen E-Module aus der statischen Messung zeigen eine höhere Korrelation zur Biegefestigkeit ($R = 0,77$ und $R = 0,73$) als der E-Modul auf Grundlage der dynamischen Messung ($R = 0,58$). Außerdem beträgt der R -Wert zwischen dem lokalen und globalen E-Modul $R = 0,95$.

Der dynamische E-Modul weist im Allgemeinen hohe Korrelationen zu den statischen Messgrößen auf. Dies bestätigt auch die Ergebnisse der Zugversuche. Insbesondere zeigt sich die höchste Korrelation zwischen dem dynamischen und dem globalen E-Modul mit einem R -Wert von 0,92. Die Rohdichte zeigt eine höhere Korrelation zum dynamischen E-Modul ($R = 0,87$) als zu den E-Modulen aus den statischen Messungen ($R = 0,73$ und $R = 0,82$).

Im Vergleich zu den zuvor genannten Korrelationen haben die Ästigkeitskriterien, ähnlich wie beim Zugkollektiv, niedrigere Korrelationen. Die höchste Korrelation wird zwischen dem Sortiermerkmal DEK und der Biegefestigkeit dokumentiert ($R = 0,27$). Im Vergleich dazu liegt der R -Wert zwischen dem Sortiermerkmal DEB und der Biegefestigkeit bei nur 0,11. Die weiteren Sortiermerkmale aus

der Brettsortierung, DAB und DSB, haben jeweils einen Korrelationskoeffizienten von $R = 0,23$ zur Biegefestigkeit. Basierend auf den genannten Korrelationen erfolgt die visuelle Sortierung in Kapitel 6.2 gemäß den Sortierregeln für Kanthölzer. Des Weiteren besteht keine signifikante Korrelation (p -Wert $> 0,01$) zwischen den Astkriterien DAB, DSB und DEK.

4.2.2 Ergebnisse an Keilzinkenverbindungen

Mechanische und physikalische Eigenschaften der Keilzinkenverbindungen

Die statistischen Kennwerte – Mittelwert, Variationskoeffizient (VK) und 5%-Quantil nach Kapitel 3.4 – der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Keilzinkenverbindungen in tansanischem Kiefernholz (*Pinus patula*) sind in Tabelle 4-7 aufgeführt.

Tabelle 4-7: Statistische Kennwerte (Mittelwert, Variationskoeffizient (VK), 5%-Quantil) der Biegefestigkeit, der Rohdichte und der Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Prüfung im Rahmen der Keilzinkenprüfung, n = 88

	$f_{KZ,m}$ N/mm^2	$\rho_{KZ,12}$ kg/m^3	$u_{KZ,stat}$ %
Mittelwert	23,8	448	11,0
VK [%]	16,0	12,3	6,1
5%-Quantil	17,4*	349**	-

* Log-Normalverteilung; ** Normalverteilung

Die Holzfeuchte der Keilzinkenproben zum Zeitpunkt der Prüfung ist vergleichbar mit der Holzfeuchte des Zug- und Biegekollektivs, sowohl hinsichtlich des Mittelwerts als auch der Streuung (VK < 10%). Biegefestigkeit und Rohdichte variieren im Vergleich zu den Ergebnissen aus der Biegeprüfung am Vollholz nicht so stark. Hier liegen die Variationskoeffizienten nach Tabelle 4-7 bei 16,0% für die Biegefestigkeit und bei 12,3% für die Rohdichte.

Im Gegensatz zu den unsortierten Vollholzproben bei Biegebelastung können die unsortierten Keilzinkenverbindungen in die Festigkeitsklasse C16 nach EN 388 [4] eingestuft werden. Hierbei ist das 5%-Quantil der Biegefestigkeit $f_{KZ,m,k}$ von 17,4 N/mm² maßgebend. Auch das 5%-Quantil der Rohdichte $\rho_{KZ,k}$ von 349 kg/m³ liegt über dem erforderlichen Grenzwert aus Tabelle 3-2.

Verteilungen der mechanischen und physikalischen Eigenschaften

Durch die in Abbildung 4-7 (a) und (b) dargestellten Wahrscheinlichkeitsdichten und kumulierten Häufigkeiten der mechanischen und physikalischen Eigenschaften aus der statischen Messung, werden die empfohlenen Verteilungen aus EN 14358 [56] und der in Kapitel 3.3 erwähnten Fachliteratur grundsätzlich bestätigt.

Wie bei den Vollholzproben erweist sich die Log-Normalverteilung als geeignetere Verteilungsfunktion für die Darstellung der Verteilung der Biegefestigkeit. Ursächlich hierfür kann die Unterschätzung der Log-Normalverteilung gegenüber der Überschätzung der Normalverteilung bezüglich der Festigkeitsverteilung im Bereich des 5%-Quantils angesehen werden. Auffällig ist, dass die Normalverteilung aus Abbildung 4-7 (b) die tatsächliche Verteilung der Rohdichte im Bereich des 5%-Quantils deutlich überschätzt. Dies trifft jedoch auch bei der Log-Normalverteilung im Bereich des 5%-Quantils zu. Aufgrund dessen wird, wie in EN 14358 Abschnitt 3.2.2 [56] vorgeschrieben, die Normalverteilung zur Beschreibung der tatsächlichen Verteilung der Rohdichte verwendet.

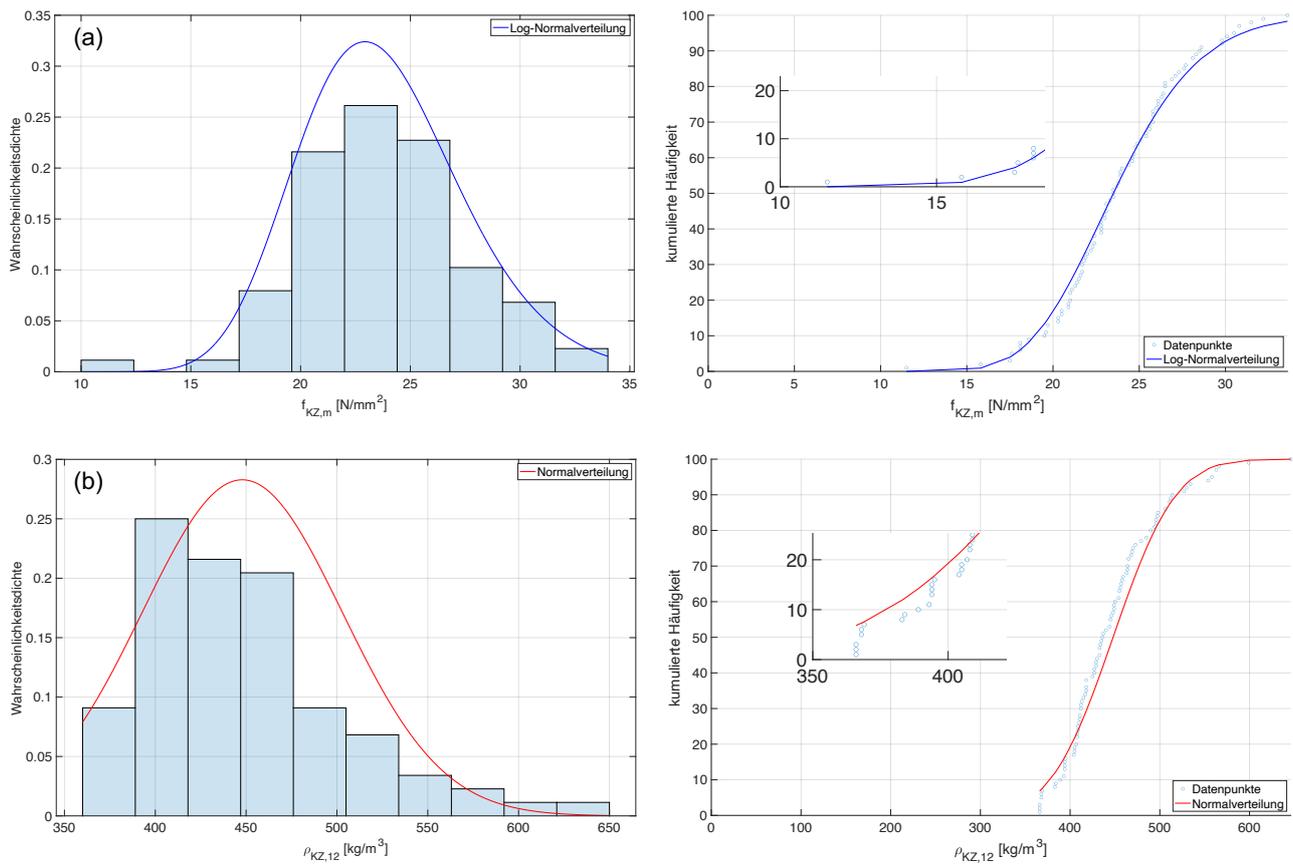


Abbildung 4-7: Wahrscheinlichkeitsdichten und kumulierte Häufigkeiten der statischen Messergebnisse des Keilzinkenkollektivs; (a) Biegefestigkeit in N/mm²; (b) Rohdichte in kg/m³; n = 88

Versagensarten der Keilzinkenverbindung

Bei der Beurteilung der Bruchursachen wird zwischen drei Versagensarten unterschieden: Bruch außerhalb der Keilzinkenverbindung ($Bruch_a$), Grundbruch ($Bruch_{Gr}$) und Scherbruch ($Bruch_s$). Die Bruchursachen der Keilzinkenverbindungen werden dabei in Abhängigkeit von der Prüfkörperbreite auf 10% genau bestimmt. Tabelle 4-8 zeigt eine Übersicht der Häufigkeiten der Bruchursachen. Die häufigste Versagensart ist das Scherversagen der Keilzinkenverbindung mit einem Mittelwert von 43,6%. Im Vergleich dazu liegen die Mittelwerte der Versagensarten $Bruch_{Gr}$ und $Bruch_a$ deutlich niedriger bei 34,0% und 22,4%.

Außerdem weisen insgesamt 16 Keilzinkenverbindungen ein reines Scherversagen (siehe Abbildung 4-8) auf. Einen reinen Grundbruch, wie er in Abbildung 4-9 zu sehen ist, haben hingegen nur drei Prüfkörper.

Tabelle 4-8: Häufigkeiten der Bruchursachen ($Bruch_a$ - Bruch außerhalb der Keilzinkenverbindung; $Bruch_{Gr}$ - Grundbruch; $Bruch_s$ - Scherbruch) bei keilgezinkten Kiefernproben, $n = 88$

	$Bruch_a$	$Bruch_{Gr}$	$Bruch_s$
Mittelwert	22,4	34,0	43,6
VK [%]	143,2	97,1	83,9



Abbildung 4-8: Bruchbild eines reinen Scherbruchs, Keilzinkenprobe



Abbildung 4-9: Bruchbild eines reinen Grundbruchs, Keilzinkenprobe

5 Sortierung auf Grundlage der Zugprüfung

5.1 Optimale Sortierung

Die Ausbeuten der optimalen Sortierung ausgewählter Zugfestigkeitsklassenkombinationen sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Bei der Auswahl wird sich auf die Klassenkombinationen zur Herstellung der gängigsten Festigkeitsklassen für Vollholz (T14 und T21) und BSH (GL24h/c, GL28h, GL30h) beschränkt. Aufgrund der in Kapitel 4.1 beschriebenen niedrigen mechanischen und physikalischen Eigenschaften von *Pinus patula* wird zusätzlich die niedrigste Zugfestigkeitsklasse T8 nach EN 338 [5] angegeben. Außerdem werden die Zugfestigkeitsklassenkombinationen für die BSH-Klassen GL20c und GL26h aufgeführt. Ergebnisse der optimalen Sortierung für weitere Zugfestigkeitsklassenkombinationen sind in Tabelle A-1 in Anhang A dargestellt.

Neben den Ausbeuten enthält Tabelle 5-1 auch die charakteristischen Werte der ausgewählten Zugfestigkeitsklassenkombinationen. Auffällig ist, dass die berechneten charakteristischen Kennwerte der Klasse T14 auch die erforderlichen charakteristischen Grenzwerte der Klassen T14,5 und T15 einhalten. Dies trifft ebenfalls für das Kiefernholz der Klasse T21 zu, welches auch die Anforderungen der Klasse T22 erfüllt. Daher können bei der Sortierung in die höchste Klasse der Kombinationen sowohl T15/T14 als auch T22/T21 zusammengefasst werden. Die limitierende Eigenschaft für die Zuordnung zu einer Festigkeitsklasse ist, wie in Tabelle 5-1 dargestellt, grundsätzlich die Zugfestigkeit. Die Auswirkungen der weiteren festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften auf die Klassenzuordnung werden am Beispiel der Festigkeitsklasse T15/T14 in der Klassenkombinations-Nr. (3) erläutert. Der charakteristische Mittelwert des Zug-E-Moduls $E_{t,0,mean}$ in dieser Festigkeitsklasse liegt beispielsweise bei $12,4 \text{ kN/mm}^2$, also 14% über dem erforderlichen charakteristischen Grenzwert von $10,9 \text{ kN/mm}^2$ aus Tabelle 3-1. In derselben Klassenkombination ist die charakteristische Rohdichte $\rho_{t,k}$ um 19% höher als der erforderliche Grenzwert. Im Vergleich dazu liegt die charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ bei $15,8 \text{ N/mm}^2$, also lediglich 5% über dem erforderlichen charakteristischen Grenzwert.

In Abbildung 5-1 (a) und (b) sind die Ausbeuten der höchsten Klasse in der Kombination (a) und der niedrigsten Klasse in der Kombination (b) dargestellt. Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass die höchsten Ausbeuten durch die primäre Sortierung nach der Zugfestigkeit und dem Zug-E-Modul erreicht werden. Mit der primären Sortierung auf Grundlage der Rohdichte werden nur geringe Ausbeuten in den unteren Festigkeitsklassen erzielt.

Die Ausbeuten der Klassenkombinationen sind in Abbildung 5-1 (c) zu sehen. Die Abbildung zeigt, dass die Ausbeuten der meisten Klassenkombinationen bei über 80% liegen. Die Klassenkombinationen T13-T8 und T15/T14-T9 weisen jedoch eine Ausbeute von weniger als 80% auf. Sie werden dennoch bei der Auswahl berücksichtigt, da diese für die Herstellung von BSH in den Festigkeitsklassen GL20c und GL24c von Bedeutung sind.

Tabelle 5-1: Charakteristische Kennwerte, Verhältnisse von charakteristischen Kennwerten zu erforderlichen Grenzwerten und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimalen Sortierung für ausgewählte Zugfestigkeitsklassenkombinationen, n = 90

Nummer Kombination	$f_{t,0,k}$ N/mm ²	$E_{t,0,mean}$ kN/mm ²	$\rho_{t,k}$ kg/m ³	$\frac{f_{t,0,k}}{f_{t,erf}}$	$\frac{E_{t,0,mean}}{E_{t,erf}}$	$\frac{\rho_{t,k}}{\rho_{t,erf}}$	Ausbeute –	T- Klasse
(1)	8,0	7,7	311	1,00	1,15	1,07	0,82	T8
(2)	13,8	9,6	351	1,06	1,01	1,17	0,32	T13
T13-T8	9,2	6,7	328	1,15	1,00	1,13	0,46	T8
(3)	15,8	12,4	430	1,05	1,14	1,19	0,11	T15/T14
T15/T14-T9	9,1	7,2	339	1,01	1,01	1,13	0,66	T9
(4)	20,9	11,7	373	1,31	1,08	1,01	0,10	T16
T16-T8	8,1	7,1	317	1,01	1,06	1,09	0,77	T8
(5)	19,1	12,9	437	1,06	1,13	1,15	0,09	T18
T18-T8	8,1	7,0	318	1,01	1,04	1,10	0,77	T8
(6)	22,2	13,0	447	1,01	1,05	1,15	0,08	T22/T21
T22/T21-T8	8,0	7,1	318	1,0	1,06	1,10	0,79	T8

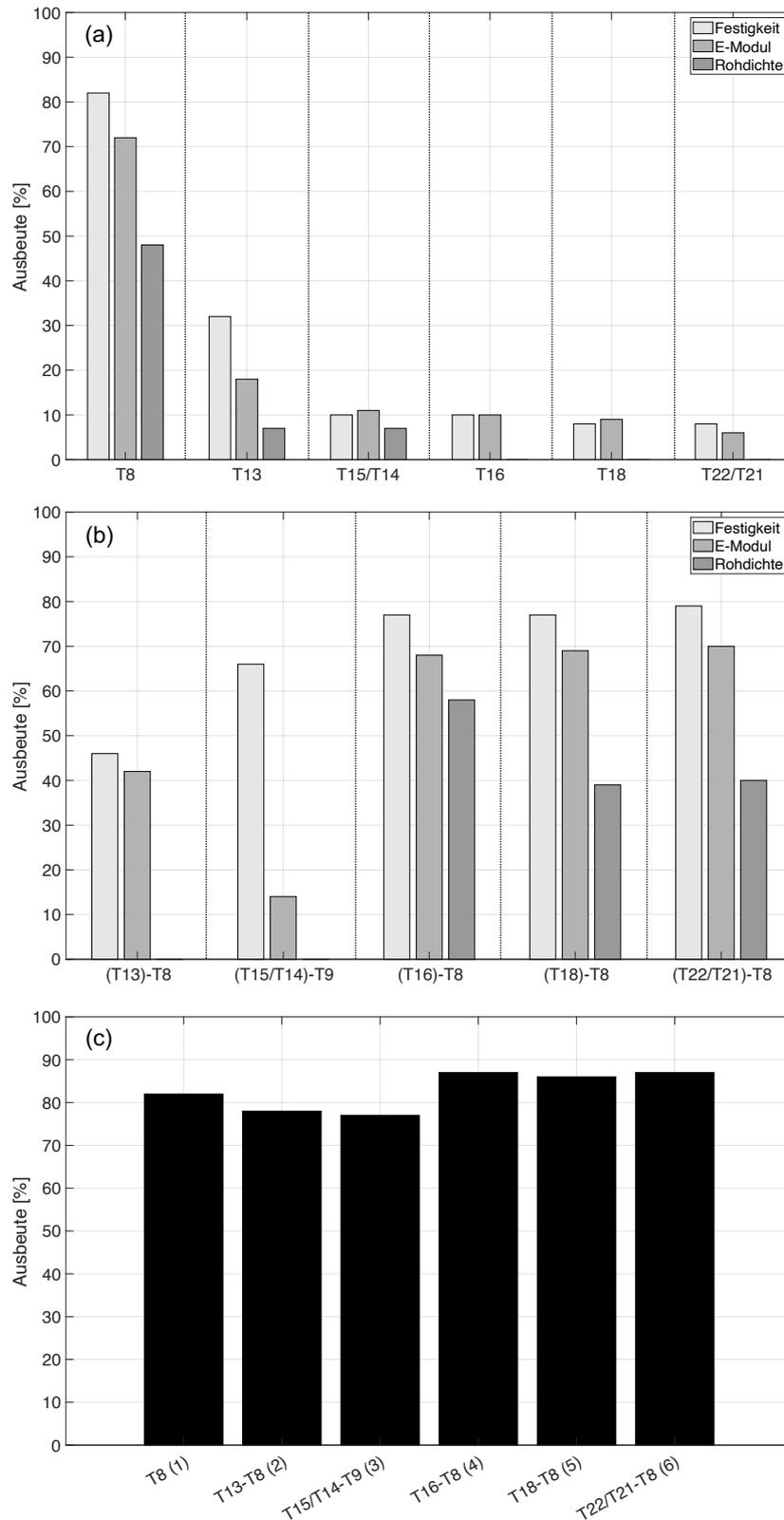


Abbildung 5-1: Ausbeuten der optimalen Sortierung in ausgewählte Zugfestigkeitsklassenkombinationen für (a) höchste Klasse der Kombination (erste Klasse); (b) niedrigste Klasse der Kombination (zweite Klasse); (c) Gesamtausbeute der jeweiligen Klassenkombination, n = 90

5.2 Visuelle Sortierung

5.2.1 Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 [6]

Die charakteristischen Werte und Ausbeuten der Sortierklassen für das visuell sortierte Zugkollektiv nach DIN 4074-1 [6] – Sortierregeln für Bretter und Bohlen (siehe Tabelle 3-3) – sind in Tabelle 5-2 aufgeführt. Bei der Sortierung bleiben die Sortiermerkmale Jahrringbreite, Verdrehung, Längskrümmung und Querkrümmung unberücksichtigt (siehe Kapitel 3.6). Außerdem wird zwischen den Varianten Brett- und Lamellensortierung unterschieden.

Tabelle 5-2: Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 [6] des Zugkollektivs, gegliedert nach angewandten Sortierregeln für Bretter und Bohlen (Brett- und Lamellensortierung), n = 90

	Sortier- klasse	$f_{t,0,k}$ N/mm ²	$E_{t,0,mean}$ kN/mm ²	$\rho_{t,k}$ kg/m ³	Ausbeute –	T- Klasse
Brett- sortierung	S13	-	-	-	0,00	-
	S10	5,4	7,7	271	0,41	-
	S7	6,6	6,9	300	0,48	-
Lamellen- sortierung	S13	-	-	-	0,01	-
	S10	5,8	7,7	282	0,53	-
	S7	6,2	6,6	290	0,34	-

Aus Tabelle 5-2 ist ersichtlich, dass die Äste an den Schmalseiten der Prüfkörper Einfluss auf die visuelle Sortierung haben. So kann beispielsweise bei der Brettsortierung – mit Berücksichtigung von Schmalseitenästen – kein Prüfkörper der Sortierklasse S13 zugeordnet werden. Werden die Sortierregeln für Lamellen angewandt – ohne Berücksichtigung von Schmalseitenästen – kann nur ein Prüfkörper in die Sortierklasse S13 eingestuft werden. Somit ist der Unterschied in der Sortierklasse S13 der beiden Varianten marginal. Größere Unterschiede der beiden Varianten gibt es bei der Sortierung in die Klassen S10 und S7. Bei der Brettsortierung können 41% der Grundgesamtheit der Sortierklasse S10 und 48% der Sortierklasse S7 zugeordnet werden. Im Vergleich dazu können bei der Lamellensortierung 53% der Grundgesamtheit in die Sortierklasse S10 und 34% in die Sortierklasse S17 eingeordnet werden.

Die charakteristischen Kennwerte der visuellen Sortierklassen des tansanischen Schnittholzes erfüllen nicht die Anforderungen für die Festigkeitsklassen aus Tabelle 3-1, sodass hier keine Zuordnung erfolgt. Wie Tabelle 5-2 zeigt, wirkt hier die charakteristische Zugfestigkeit bei der Einteilung in die Festigkeitsklassen limitierend. Deshalb wird im Folgenden ein Vorschlag zu optimierten visuellen Sortierregeln gemacht. Dieser Sortiervorschlag legt außerdem Grenzwerte für die bisher noch unberücksichtigte Jahrringbreite fest.

5.2.2 Optimierte visuelle Sortierregeln

Die optimierten visuellen Sortierregeln werden anhand von insgesamt 1872 untersuchten Grenzwertkombinationen für die Sortierparameter DEB, DAB und Jahrringbreite (JRB) bestimmt. In Tabelle 5-3 sind die Grenzwerte der Sortierklassen mit den größten Ausbeuten in den höchsten Festigkeitsklassen sowie deren charakteristische Werte dargestellt. Weitere untersuchte Grenzwertkombinationen der optimierten visuellen Sortierung sind in Tabelle A-2 in Anhang A aufgeführt.

Tabelle 5-3: Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten visuellen Sortierregeln für ausgewählte Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEB, DAB, JRB), n = 90

Grenzwertkombination	Grenzwerte			charakteristische Werte			Ausbeute	T-Klasse
	DEB	DAB	JRB mm	$f_{t,0,k}$ N/mm ²	$E_{t,0,mean}$ kN/mm ²	$\rho_{t,k}$ kg/m ³		
DIN (S7+)	0,5	2/3	6	7,8	10,0	393	0,29	-
A	0,6	0,7	14	8,4	8,6	343	0,64	T8
B	0,3	0,6	10	9,5	9,3	351	0,36	T9
C	0,5	0,6	4	10,8	10,8	399	0,13	T10
D	0,3	0,6	4	12,6	11,0	381	0,09	T12

Wie aus den optimierten Sortierregeln der Tabelle 5-3 zu erkennen ist, sind mit diesen Sortierregeln im Vergleich zur visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 [6] insgesamt vier unterschiedliche Festigkeitsklassen möglich. Die erreichten Festigkeitsklassen nach Tabelle 3-1 liegen zwischen den Klassen T8 und T12. Wie auch bei der optimalen und visuellen Sortierung wird die Zuordnung in die Festigkeitsklassen durch die charakteristische Zugfestigkeit limitiert. In der Grenzwertkombination A liegt beispielsweise die charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ nur 5% über dem erforderlichen Grenzwert aus Tabelle 3-1 in der entsprechenden Festigkeitsklasse. Die charakteristischen Werte des E-Moduls $E_{t,0,mean}$ und der Rohdichte $\rho_{t,k}$ liegen dagegen mit einer Überschreitung von 28% und 18% deutlich über den entsprechenden Grenzwerten.

In Abbildung 5-2 werden die Ausbeuten aus Tabelle 5-3 mit den Ausbeuten aus der optimalen Sortierung (siehe Kapitel 5.1) verglichen. Die dargestellten Ausbeuten der optimalen Sortierung beziehen sich dabei auf die höchste Klasse der Kombinationen. Die Grenzwertkombination A hat die höchste Ausbeute von 64%, jedoch kann das Holz lediglich der Festigkeitsklasse T8 zugeordnet werden. Im Vergleich zur optimalen Sortierung wird hier eine um 18% geringere Ausbeute erzielt. Die höchste Festigkeitsklasse wird durch die Grenzwertkombination D erreicht. Durch die hier ausgewählten Grenzwerte kann die Festigkeitsklasse T12 erreicht werden. Die Ausbeute ist jedoch um 34% niedriger als bei der optimalen Sortierung. Des Weiteren werden die Festigkeitsklassen T9 und T10 mit einer Ausbeute von 36% und 13% erreicht.

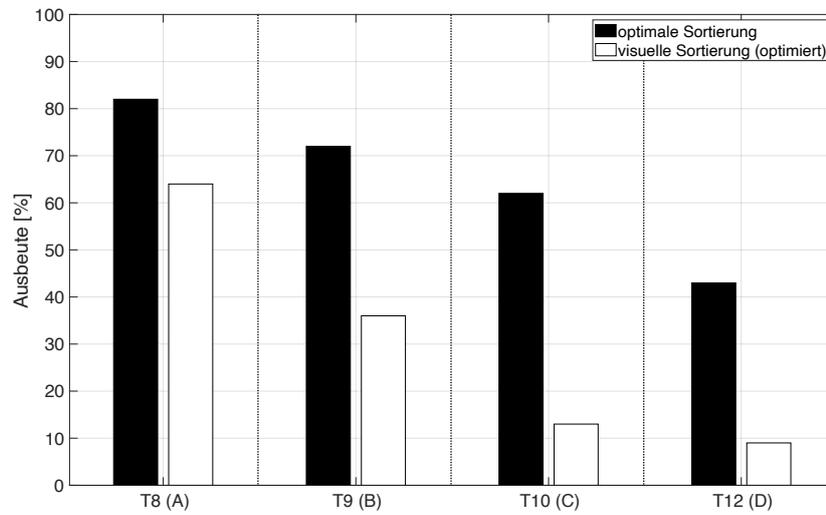


Abbildung 5-2: Ausbeuten und Zugfestigkeitsklassen der Sortierklassen, die mit den optimierten visuellen Sortierregeln erzielt werden, n = 90

5.3 Maschinelle Sortierung

Eine Ergebnisauswahl der Sortierung nach den Maschinensystemen aus Kapitel 3.7 ist in den Tabellen 5-4 bis 5-6 dargestellt. Die Tabellen enthalten Grenzwerte für die berechneten IP_s , je nach untersuchten Festigkeitsklassen, sowie die charakteristischen Werte der Festigkeitsklassen. Tabelle 5-4 stellt die Ergebnisse mit $IP_1 (E_{dyn,12,i})$, Tabelle 5-5 die Ergebnisse mit $IP_2 (E_{dyn,12,mean})$ und Tabelle 5-6 die Ergebnisse mit $IP_3 (\rho_{12})$ dar. Ausbeuten von weiteren Klassenkombinationen auf Basis der maschinellen Sortierung sind in Tabelle A-3 in Anhang A aufgeführt.

Analog zur optimalen Sortierung werden die Festigkeitsklassen T14,5 und T14 bei der Sortierung in die höchste Klasse der Klassenkombination zusammengeführt, da die berechneten charakteristischen Kennwerte die erforderlichen Grenzwerte beider Klassen erfüllen. Die Festigkeitsklasse T22 kann gegenüber der optimalen Sortierung durch die ausgewählten Maschinensysteme nicht erreicht werden. Ähnlich wie bei der optimalen Sortierung wirkt auch hier die Zugfestigkeit bei der Zuordnung in die Festigkeitsklassen limitierend. Bei der Sortierung mit IP_1 beträgt der charakteristische Mittelwert des Zug-E-Moduls $E_{t,0,mean}$ in der Festigkeitsklasse T16 in der Klassenkombinations-Nr. (4) beispielsweise $13,2 \text{ kN/mm}^2$ und liegt damit 21% über dem erforderlichen charakteristischen Wert aus Tabelle 3-1. Die charakteristische Rohdichte $\rho_{t,k}$ in derselben Klassenkombination liegt 22% über dem erforderlichen Grenzwert. Im Gegensatz dazu beträgt die charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ $16,6 \text{ N/mm}^2$, was lediglich eine 4%ige Überschreitung des erforderlichen charakteristischen Grenzwertes darstellt.

Tabelle 5-4: Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP_1 = E_{dyn,12,i}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Zugfestigkeitsklassenkombinationen, n = 87

Nummer Kombination	Grenzwert kN/mm^2	$f_{t,0,k}$ N/mm^2	$E_{t,0,mean}$ kN/mm^2	$\rho_{t,k}$ kg/m^3	Ausbeute –	T- Klasse
(1)	$IP_1 > 6,7$	8,0	8,7	342	0,70	T8
(2)	$IP_1 > 12,0$	15,6	12,9	440	0,11	T13*
T13-T8	$IP_1 > 5,7$	8,0	7,6	343	0,69	T8
(3)	$IP_1 > 12,0$	15,6	12,9	440	0,11	T14,5/T14*
T14,5/T14-T9	$IP_1 > -$	-	-	-	0,00	T9
(4)	$IP_1 > 12,5$	16,6	13,2	452	0,10	T16
T16-T8	$IP_1 > 5,7$	8,1	7,6	344	0,70	T8
(5)	$IP_1 > 13,9$	21,1	14,4	444	0,06	T18**
T18-T8	$IP_1 > 6,0$	8,1	8,0	341	0,72	T8
(6)	$IP_1 > 13,9$	21,1	14,4	444	0,06	T21**
T21-T8	$IP_1 > 6,0$	8,1	8,0	341	0,72	T8

* Festigkeitsklassen können zusammengefasst werden, außerdem werden die Grenzwerte für T15 eingehalten

** Festigkeitsklassen können zusammengefasst werden

Tabelle 5-5: Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP_2 = E_{dyn,12,mean}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Zugfestigkeitsklassenkombinationen, n = 87

Nummer Kombination	Grenzwert kN/mm^2	$f_{t,0,k}$ N/mm^2	$E_{t,0,mean}$ kN/mm^2	$\rho_{t,k}$ kg/m^3	Ausbeute –	T- Klasse
(1)	$IP_2 > 8,1$	8,1	9,2	336	0,55	T8
(2)	$IP_2 > 10,8$	14,9	12,8	386	0,10	T13*
T13-T8	$IP_2 > 7,6$	8,0	8,1	340	0,55	T8
(3)	$IP_2 > 10,8$	14,9	12,8	386	0,10	T14,5/T14*
T14,5/T14-T9	$IP_2 > 10,0$	9,1	9,3	356	0,11	T9
(4)	$IP_2 > 10,9$	16,4	13,3	402	0,09	T16**
T16-T8	$IP_2 > 7,4$	8,0	8,0	340	0,61	T8
(5)	$IP_2 > 11,3$	20,3	14,3	407	0,06	T18
T18-T8	$IP_2 > 7,4$	8,1	8,2	342	0,64	T8

* Festigkeitsklassen können zusammengefasst werden

** IP -Wert erfüllt außerdem die Grenzwerte für T15

Tabelle 5-6: Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP_3 = \rho_{12}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Zugfestigkeitsklassenkombinationen, n = 87

Nummer	Grenzwert kN/mm^2	$f_{t,0,k}$ N/mm^2	$E_{t,0,mean}$ kN/mm^2	ρ_k kg/m^3	Ausbeute –	T- Klasse
(1)	$IP_3 > 468$	8,2	9,5	381	0,47	T8

In Abbildung 5-3 werden die Ausbeuten der maschinellen Sortierung mit den Ausbeuten der optimalen Sortierung verglichen. Abbildung 5-3 (a) stellt die Ausbeuten der höchsten, auch ersten Klasse der Kombination dar. In Abbildung 5-3 (b) sind die Ausbeuten der niedrigsten Klasse in der Kombination dargestellt, während Abbildung 5-3 (c) die Ausbeuten der jeweiligen Klassenkombinationen zeigt. Die Ergebnisse der optimalen Sortierung beziehen sich auf die höchste Klasse der Kombination.

Wie in Abbildung 5-3 deutlich zu sehen ist, werden die höchsten Ausbeuten durch die Sortierung mit IP_1 und IP_2 erzielt. Bei der Sortierung mit IP_3 werden im Allgemeinen nur niedrige Ausbeuten in den untersten Festigkeitsklassen erreicht. Dies bestätigt auch die Ergebnisse der optimalen Sortierung hinsichtlich der primären Sortierung nach der Rohdichte. Aus Abbildung 5-3 (a) geht hervor, dass in der ersten Klasse der Kombination grundsätzlich die höchsten Ausbeuten durch die Sortierung mit IP_1 erreicht werden. Jedoch sind die Ausbeuten in den höheren Festigkeitsklassen bei der Sortierung mit IP_1 und IP_2 vergleichbar. Die höchste Festigkeitsklasse T21 ist nur durch die Sortierung mit IP_1 möglich. Die Ausbeute in der Kombination T14,5/T14-T9 durch die Sortierung mit IP_2 weist im Vergleich zur optimalen Sortierung mit 21% eine auffällig geringe Ausbeute auf. Dies ist auf die niedrige Ausbeute in der niedrigsten Klasse der Kombination, wie in Abbildung 5-3 (b) zu sehen ist, zurückzuführen.

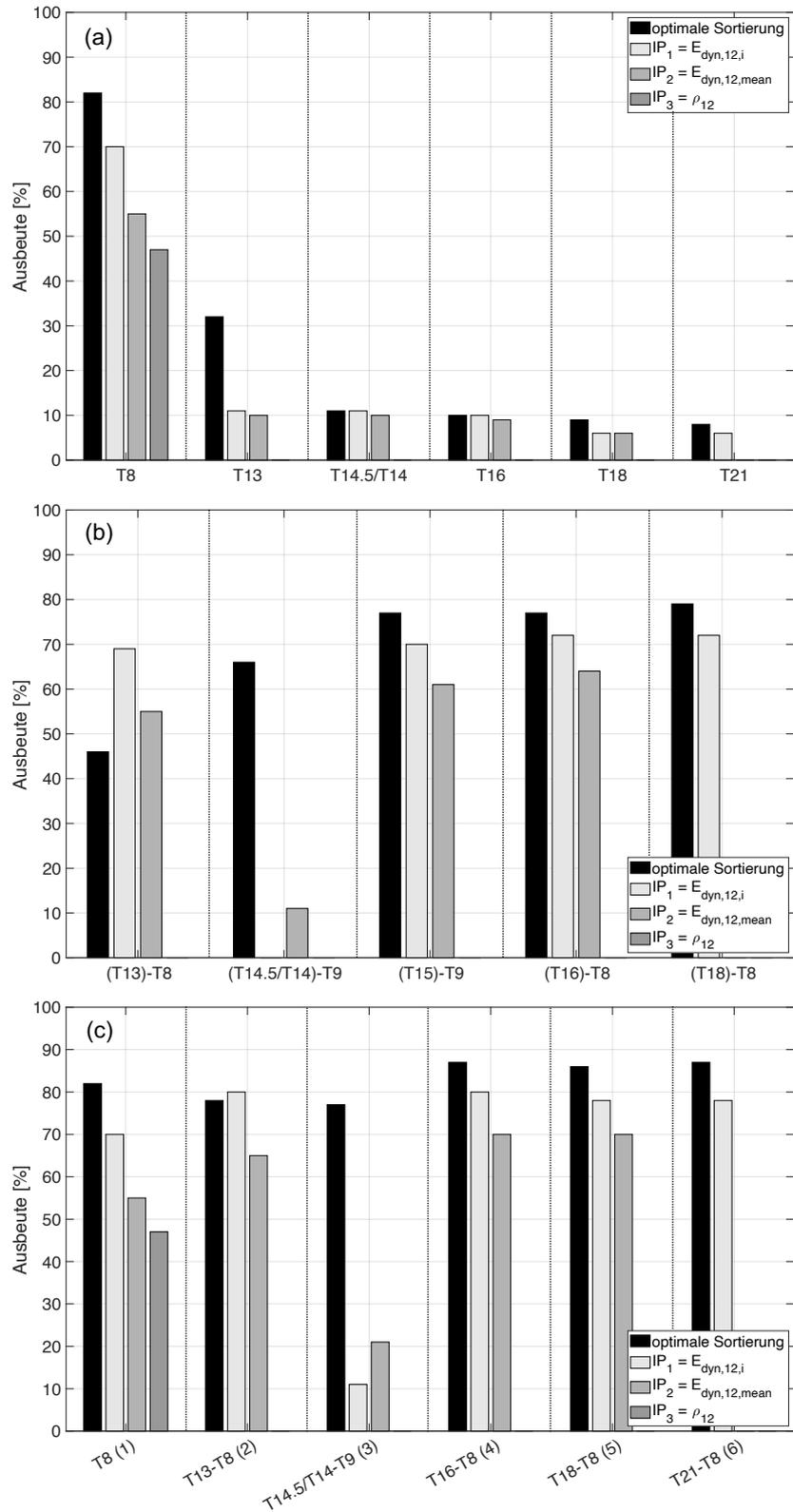


Abbildung 5-3: Ausbeuten der maschinellen Sortierung in ausgewählte Zugfestigkeitsklassenkombinationen für (a) höchste Klasse der Kombination (erste Klasse); (b) niedrigste Klasse der Kombination (zweite Klasse); (c) Gesamtausbeute der jeweiligen Klassenkombination, n = 87

5.4 Kombinierte maschinelle und visuelle Sortierung

Aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Sortiermethoden werden neue Grenzwerte für insgesamt 1078 unterschiedliche Grenzwertkombinationen aus visuellen und maschinellen Sortierparametern untersucht. Es wird eine Kombination von IP_1 und IP_2 mit den visuellen Sortiermerkmalen DEB und DSB untersucht. In Tabelle 5-7 sind ausgewählte Grenzwertkombinationen der neuen Sortierklassen dargestellt. Außerdem werden hier die erreichten Festigkeitsklassen sowie die Ausbeuten der Sortierklassen aufgeführt. Tabelle A-4 in Anhang A zeigt weitere Grenzwertkombinationen der kombinierten Sortierung. Aus den Grenzwertkombinationen der Tabelle 5-7 geht hervor, dass das Sortiermerkmal DAB keine Auswirkung auf die Sortierung in die unteren Festigkeitsklassen hat, da die maximal erfasste Astansammlung nach Gleichung (3.31) bei 0,697 liegt. Erst ab einer Sortierung in die Festigkeitsklasse T16 wird das Sortiermerkmal ausschlaggebend.

Tabelle 5-7: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für ausgewählte Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter (IP_1 , IP_2 , DEB, DAB), $n = 87$

Grenzwert- kombination	IP_1 <i>kN/mm²</i>	IP_3 <i>kg/m³</i>	DEB –	DAB –	Ausbeute –	T- Klasse
A	7,0	-	0,7	0,7	0,68	T8
B	8,0	-	0,3	0,7	0,43	T9
C	12,0	-	0,5	0,7	0,11	T15
D	12,0	-	0,5	0,6	0,09	T18
E	12,0	-	0,5	0,5	0,08	T22
F	-	400	0,3	0,7	0,57	T8

Tabelle 5-8 zeigt die charakteristischen Werte der Sortierklassen aus der kombinierten Sortierung in Abhängigkeit von deren Grenzwertkombinationen. Es wird deutlich, dass auch hier die charakteristische Zugfestigkeit die Zuordnung zu einer Festigkeitsklasse limitiert. Im Allgemeinen zeigt die Kombination der visuellen Sortiermerkmale mit IP_1 bessere Sortierergebnisse, bezogen auf Ausbeute und erreichte mechanische Eigenschaften, als eine Kombination mit IP_3 . Bei der Kombination mit IP_3 ist lediglich eine Zuordnung in die niedrigste Festigkeitsklasse – T8 – mit einer Ausbeute von 57% möglich. Dies bestätigt wiederum die Ergebnisse der optimalen sowie maschinellen Sortierung hinsichtlich der Ausbeuten in der Festigkeitsklasse T8. Im Vergleich dazu wird bei der Kombination mit IP_1 eine um 11% höhere Ausbeute in dieser Festigkeitsklasse erreicht. Außerdem ist bei der Kombination mit IP_1 eine Zuordnung in insgesamt 7 weitere Festigkeitsklassen möglich. Durch die neuen Grenzwertkombinationen werden die Festigkeitsklassen T9, T15, T18 und T22 erreicht.

Tabelle 5-8: Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der aufgeführten Grenzwertkombinationen für ausgewählte Zugfestigkeitsklassen, n = 87

Grenzwert- kombination	$f_{t,0,k}$ N/mm ²	$E_{t,0,mean}$ kN/mm ²	$\rho_{t,k}$ kg/m ³	Ausbeute –	T- Klasse
A	8,0	8,6	346	0,68	T8
B	9,2	9,2	353	0,43	T9
C	15,6	12,3	440	0,11	T15
D	19,1	12,9	437	0,09	T18
E	22,2	13,0	447	0,08	T22
F	8,2	8,2	329	0,57	T8

Die Ausbeuten der Sortierklassen, sortiert nach den kombinierten Sortierregeln, sind in Abbildung 5-4 den Ausbeuten der ersten Klasse der optimalen Sortierung aus Kapitel 5.1 gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass durch die Kombination der visuellen und maschinellen Sortierparameter, vor allem in den höheren Festigkeitsklassen, ähnliche Ausbeuten wie bei der optimalen Sortierung erreicht werden können. Erwähnenswert ist, dass in den Festigkeitsklassen T15, T18 und T22 durch die neuen Grenzwertkombinationen die gleichen Ausbeuten wie bei der optimalen Sortierung möglich sind.

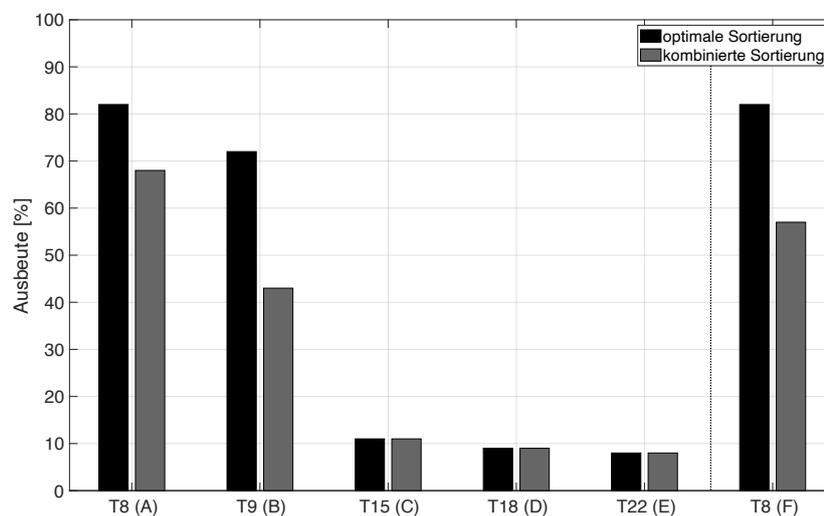


Abbildung 5-4: Ausbeuten und Zugfestigkeitsklassen der Sortierklassen, die mit den kombinierten Sortierregeln erzielt werden, n = 87

5.5 Vergleich der Sortiermethoden

In Abbildung 5-5 sind die Ausbeuten ausgewählter Zugfestigkeitsklassen, die mit den Sortiermethoden aus Kapitel 5.2 bis 5.4 erreicht werden, dargestellt. Dabei handelt es sich um die Ausbeuten in den höchsten Klassen der untersuchten Kombinationen. Da durch die kombinierte Sortierung der visuellen Sortiermerkmale mit IP_1 bessere Sortierergebnisse erreicht werden als durch eine Kombination mit IP_3 , wird sich in der Abbildung auf die Darstellung der Ergebnisse aus der Kombination mit IP_1 beschränkt. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Sortierverfahrens werden in der Abbildung zusätzlich die Ausbeuten aus der optimalen Sortierung aufgenommen.

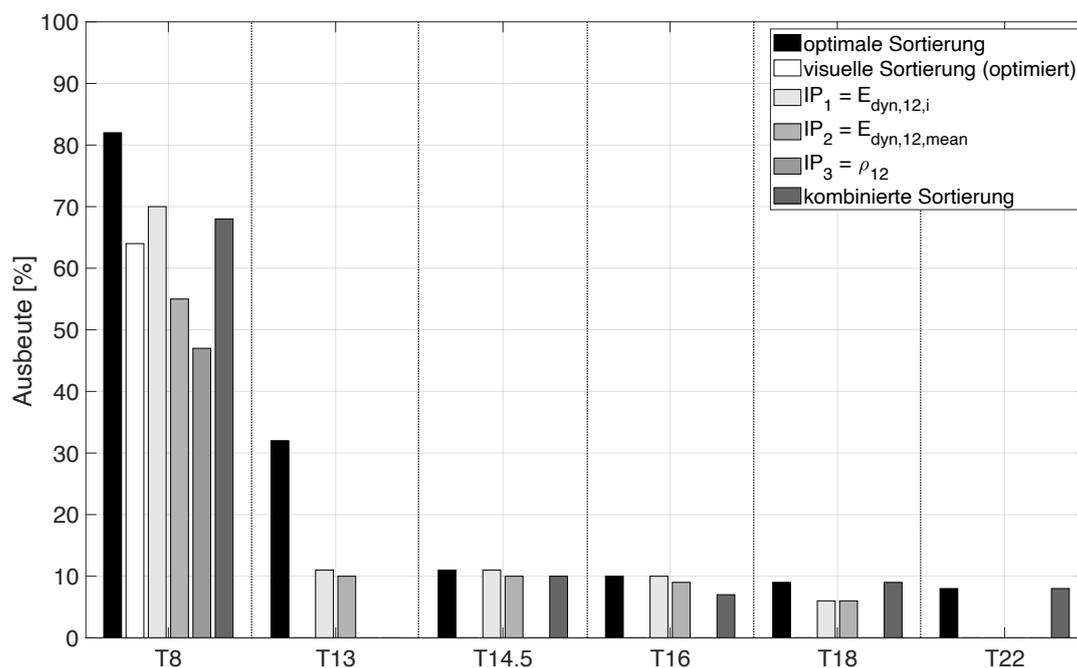


Abbildung 5-5: Auswahl an Ausbeuten verschiedener Zugfestigkeitsklassen, die mit den Sortiermethoden (optimale Sortierung, visuelle Sortierung (optimiert), $IP_1 = E_{dyn,12,i}$, $IP_2 = E_{dyn,12,mean}$, $IP_3 = \rho_{12}$, kombinierte Sortierung) erreicht werden. Festigkeitsklassen in der höchsten Klasse der untersuchten Kombinationen; n = 87

Im Allgemeinen wird mit den optimierten visuellen Sortierregeln aus Kapitel 5.2.2 lediglich die Festigkeitsklasse T8 erreicht. Dasselbe gilt auch für die maschinelle Sortierung mit IP_3 aus Kapitel 5.3. Die übrigen Sortiermethoden ermöglichen eine Zuordnung der Sortierklassen in höhere Festigkeitsklassen.

Werden die Ausbeuten in der niedrigsten Festigkeitsklasse – T8 – verglichen, so ergibt sich die niedrigste Ausbeute bei der maschinellen Sortierung mit IP_3 , gefolgt von IP_2 . Im Vergleich zu diesen Maschinensystemen werden höhere Ausbeuten bei der Sortierung nach den optimierten visuellen Sortierregeln erreicht. Werden die visuellen Sortiermerkmale zusätzlich mit dem dynamischen E-Modul kombiniert (siehe Kapitel 5.4), so wird eine Ausbeute erreicht, die 14% unter der Ausbeute der optimalen Sortierung liegt. Die höchste Ausbeute bei der Zuordnung in die Festigkeitsklasse T8

wird bei der maschinellen Sortierung mit IP_1 erzielt. Die optimale Sortierung erreicht im Vergleich dazu eine um 12% höhere Ausbeute.

Bis zur Festigkeitsklasse T16 werden die höchsten Ausbeuten durch die maschinelle Sortierung mit IP_1 und IP_2 erreicht. Ab der Festigkeitsklasse T18 werden jedoch höhere Ausbeuten mit den kombinierten Sortierregeln erreicht. So ist hier beispielsweise die Einstufung in die Klasse T22 gegenüber allen anderen Sortiermethoden möglich. Wie aus Abbildung 5-5 hervorgeht, können bei der kombinierten Sortierung in den Festigkeitsklassen T18 und T22 die gleichen Ausbeuten erzielt werden wie bei der optimalen Sortierung.

6 Sortierung auf Grundlage der Biegeprüfung

6.1 Optimale Sortierung

Die Ausbeuten ausgewählter Biegefestigkeitsklassenkombinationen auf Grundlage der optimalen Sortierung sind in Tabelle 6-1 aufgeführt. Die Auswahl beschränkt sich auf die Klassenkombinationen zur Herstellung von Vollholz in den Festigkeitsklassen C16 und C24 sowie für BSH in den Festigkeitsklassen GL20h, GL24h und GL26h. In Anbetracht der niedrigen mechanischen und physikalischen Eigenschaften von *Pinus patula* (siehe Kapitel 4.2.1) wird in der Tabelle zusätzlich auf die niedrigste Biegefestigkeitsklasse C14 nach EN 338 [4] eingegangen. Weitere Biegefestigkeitsklassenkombinationen aus der optimalen Sortierung sind in Tabelle B-1 im Anhang B zu finden.

Tabelle 6-1 zeigt neben den Ausbeuten auch die charakteristischen Werte der ausgewählten Kombinationen der Biegefestigkeitsklassen. Im Vergleich zur optimalen Sortierung des Zugkollektivs können bei der Berechnung der charakteristischen Werte des Biegekollektivs keine Festigkeitsklassen zusammengefasst werden. Wie aus Tabelle 6-1 hervorgeht, ist der charakteristische E-Modul die limitierende Eigenschaft für die Zuordnung in eine Festigkeitsklasse. Die charakteristische Biegefestigkeit und Rohdichte in der höchsten Klasse der Klassenkombination liegen im Mittel um ca. 10% über den erforderlichen Grenzwerten aus Tabelle 3-2. Die limitierenden Wirkungen der übrigen Eigenschaften werden beispielhaft anhand der Klasse C18 in der Klassenkombinations-Nr. (3) erläutert. Die charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,k}$ in dieser Festigkeitsklasse beträgt 23,8 N/mm², was eine 32%ige Überschreitung des erforderlichen Grenzwertes aus Tabelle 3-2 in der entsprechenden Festigkeitsklasse darstellt. In derselben Klassenkombination liegt die charakteristische Rohdichte $\rho_{m,k}$ um 7% über dem erforderlichen Grenzwert. Im Vergleich dazu entspricht der charakteristische E-Modul $E_{m,0,mean}$ mit 8,6 kN/mm² exakt dem erforderlichen Grenzwert aus Tabelle 3-2.

Abbildung 6-1 (a) und (b) zeigt die Ausbeuten der höchsten Klasse in der Kombination (a) und der niedrigsten Klasse in der Kombination (b). Wie aus dieser Abbildung ersichtlich ist, werden die höchsten Ausbeuten durch die primäre Sortierung nach der Biegefestigkeit und dem Biege-E-Modul erreicht. Auffällig ist, dass durch die primäre Sortierung nach dem E-Modul in der höchsten Klasse der Kombination – ab der Festigkeitsklasse C22 – höhere Ausbeuten erreicht werden als durch die primäre Sortierung nach der Biegefestigkeit. Mit der primären Sortierung nach der Rohdichte sind, wie auch schon bei der optimalen Sortierung des Zugkollektivs, nur geringe Ausbeuten möglich.

Beim Vergleich der Ausbeuten in der höchsten Klasse der Kombinationen beider Kollektive fällt auf, dass bei der optimalen Sortierung des Zugkollektivs grundsätzlich höhere Festigkeitsklassen erreicht werden. Zum Beispiel werden bei der optimalen Sortierung des Biegekollektivs weder die Festigkeitsklasse C30 (T18) noch die Festigkeitsklasse C35 (T21) erreicht. Auch die Gesamtausbeuten der unterschiedlichen Biegefestigkeitsklassenkombinationen aus Abbildung 6-1 (c) sind im Vergleich zum Zugkollektiv niedriger. Nur drei der insgesamt 6 ausgewählten Klassenkombinationen weisen eine Ausbeute von über 80% auf. Die niedrige Gesamtausbeute der Klassenkombination C18-C14 von nur 50% basiert auf der niedrigen Ausbeute in der zweiten Klasse der Kombination aus Abbildung 6-1 (b).

Tabelle 6-1: Charakteristische Kennwerte, Verhältnisse von charakteristischen Kennwerten zu erforderlichen Grenzwerten und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimalen Sortierung für ausgewählte Biegefestigkeitsklassenkombinationen, n = 95

Nummer Kombination	$f_{m,k}$ N/mm ²	$E_{m,0,mean}$ kN/mm ²	$\rho_{m,k}$ kg/m ³	$\frac{f_{m,k}}{f_{m,erf}}$	$\frac{E_{m,0,mean}}{E_{m,erf}}$	$\frac{\rho_{m,k}}{\rho_{m,erf}}$	Ausbeute –	C- Klasse
(1)	14,2	7,2	306	1,01	1,07	1,06	0,87	C14
(2)	18,2	7,6	319	1,14	1,00	1,03	0,71	C16
(3)	23,8	8,6	337	1,32	1,00	1,05	0,44	C18
C18-C14	22,4	6,7	309	1,60	1,00	1,07	0,06	C14
(4)	22,8	10,4	377	1,04	1,09	1,11	0,21	C22
C22-C14	14,0	7,0	331	1,00	1,04	1,14	0,48	C14
(5)	25,7	11,1	382	1,07	1,06	1,09	0,09	C24
C24-C14	14,3	6,7	310	1,02	1,00	1,07	0,78	C14
(6)	27,8	11,2	408	1,03	1,03	1,13	0,08	C27
C27-C14	14,4	6,8	302	1,03	1,01	1,04	0,79	C14

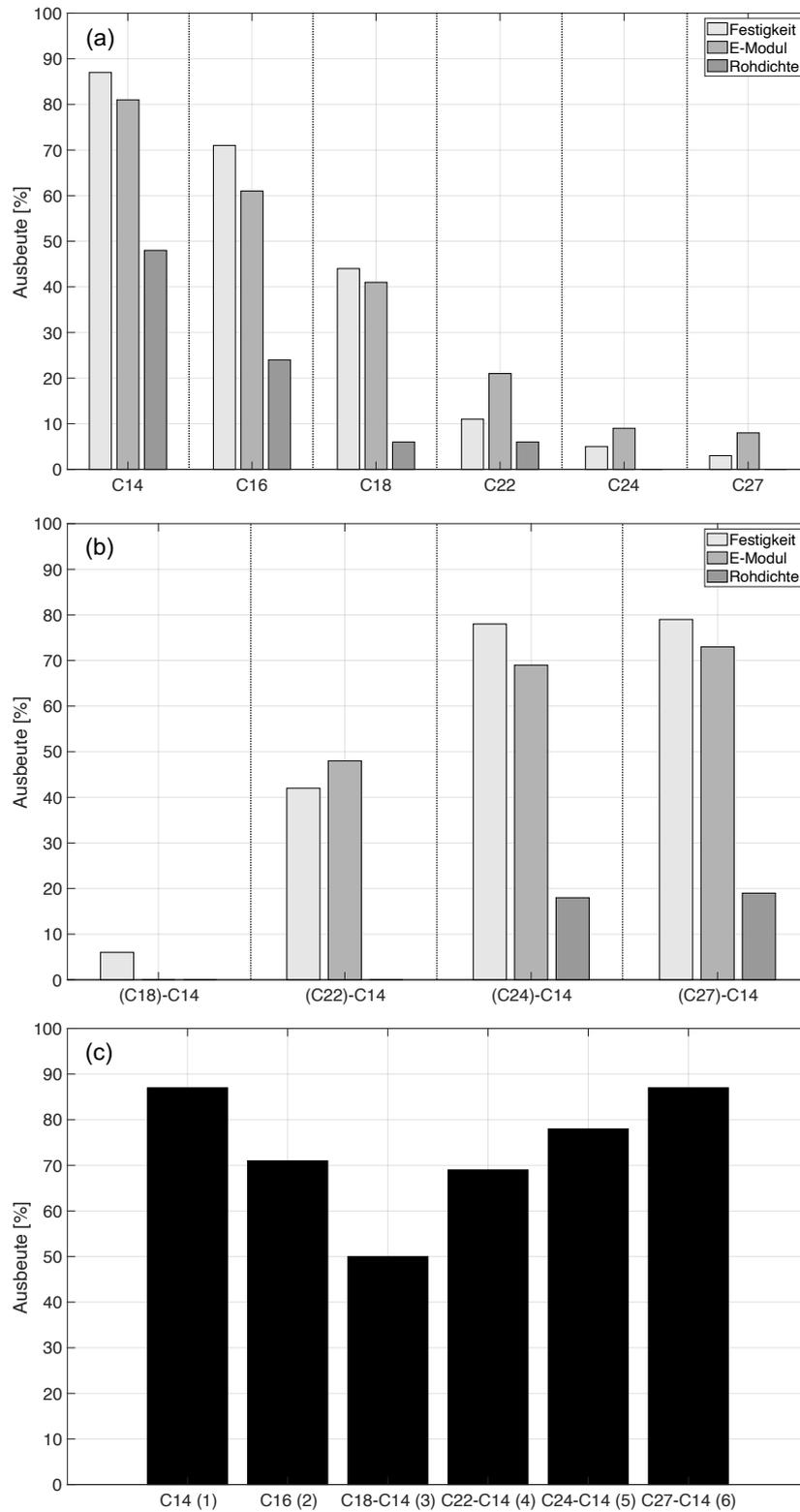


Abbildung 6-1: Ausbeuten der optimalen Sortierung in ausgewählte Biegefestigkeitsklassenkombinationen für (a) höchste Klasse der Kombination (erste Klasse); (b) niedrigste Klasse der Kombination (zweite Klasse); (c) Gesamtausbeute der jeweiligen Klassenkombination, n = 95

6.2 Visuelle Sortierung

6.2.1 Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 [6]

In Tabelle 6-2 sind die charakteristischen Werte und Ausbeuten der Sortierklassen für das visuell sortierte Biegekollektiv nach DIN 4074-1 [6] – Sortierregeln für Kanthölzer (siehe Tabelle 3-4) – aufgeführt. Ähnlich wie bei der visuellen Sortierung des Zugkollektivs werden hier die Sortiermerkmale Jahrringbreite, Längskrümmung und Verdrehung nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 3.6).

Tabelle 6-2: Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 [6] des Biegekollektivs, Sortierregeln für Kanthölzer, n = 95

Sortier- klasse	$f_{m,k}$ N/mm ²	$E_{m,0,mean}$ kN/mm ²	$\rho_{m,k}$ kg/m ³	Ausbeute –	C- Klasse
S13	-	-	-	0,01	-
S10	10,6	7,4	314	0,31	-
S7	11,3	6,5	288	0,49	-

Wie Tabelle 6-2 zeigt, kann rund die Hälfte der Grundgesamtheit der Sortierklasse S7 zugeordnet werden. Außerdem kann rund ein Drittel der Grundgesamtheit in die Sortierklasse S10 eingestuft werden. Wie auch schon bei der visuellen Sortierung des Zugkollektivs – Lamellensortierung – kann lediglich ein Prüfkörper der höchsten Sortierklasse S13 zugeordnet werden.

Wie bei der visuellen Sortierung des Zugkollektivs erfüllen auch hier die charakteristischen Werte der visuellen Sortierklassen des tansanischen Kiefernholzes nicht die Anforderungen für die Biegefestigkeitsklassen aus Tabelle 3-2. Deshalb erfolgt hier keine Zuordnung in die Festigkeitsklassen. Wie aus Tabelle 6-2 hervorgeht, limitiert vor allem die charakteristische Biegefestigkeit die Einteilung in die Festigkeitsklassen. Im folgenden Kapitel wird daher ein Vorschlag für optimierte visuelle Sortierregeln aufgeführt. Der Sortiervorschlag sieht zudem Grenzwerte für die bislang vernachlässigte Jahrringbreite vor.

6.2.2 Optimierte visuelle Sortierregeln

Die optimierten visuellen Sortierregeln werden basierend auf einer umfassenden Untersuchung von insgesamt 117 verschiedenen Grenzwertkombinationen für die Sortierparameter DEK und JRB bestimmt. Die Grenzwerte der Sortierklassen mit den größten Ausbeuten in den höchsten Festigkeitsklassen sowie deren charakteristische Werte zeigt Tabelle 6-3. Die restlichen Grenzwertkombinationen der optimierten visuellen Sortierung sind in Tabelle B-2 in Anhang B aufgeführt.

Tabelle 6-3: Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten visuellen Sortierregeln für ausgewählte Biegefestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEK, JRB), n = 95

Grenz- wertkom- bination	Grenzwerte		charakteristische Werte			Ausbeute –	C- Klasse
	DEK –	JRB mm	$f_{m,k}$ N/mm ²	$E_{m,0,mean}$ kN/mm ²	$\rho_{m,k}$ kg/m ³		
DIN (S7+)	3/5	6	13,7	8,7	387	0,26	-
A	1,0	6	14,8	8,8	389	0,33	C14
B	0,3	6	19,0	8,0	320	0,03	C16

Aus Tabelle 6-3 geht hervor, dass durch die optimierten Sortierregeln zwei unterschiedliche Festigkeitsklassen im Vergleich zur Sortierung nach DIN 4074-1 [6] erreicht werden. Die erreichten Festigkeitsklassen nach Tabelle 3-2 sind die Klassen C14 und C16. Tabelle 6-3 zeigt zudem, dass die Zuordnung in eine Festigkeitsklasse durch die charakteristische Biegefestigkeit limitiert wird und nicht wie bei der optimalen Sortierung durch den charakteristischen E-Modul. Zum Beispiel übersteigt die charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,k}$ in der Grenzwertkombination A nur um 6% den erforderlichen Grenzwert aus Tabelle 3-2 in der entsprechenden Festigkeitsklasse. Im Gegensatz dazu liegen die charakteristischen Werte des E-Moduls $E_{m,0,mean}$ und der Rohdichte $\rho_{m,k}$ mit einer Überschreitung von 31% beziehungsweise 34% deutlich über den entsprechenden Grenzwerten.

In Abbildung 6-2 wird ein Vergleich zwischen den Ausbeuten aus Tabelle 6-3 und den Ausbeuten aus der optimalen Sortierung (siehe Kapitel 6.1) angestellt. Die Ausbeuten der optimalen Sortierung stellen dabei Ausbeuten in der höchsten Klasse der Kombination dar. Werden die Grenzwerte der Kombination A herangezogen, so können rund 33% der Grundgesamtheit der Festigkeitsklasse C14 zugeordnet werden. Bei der optimalen Sortierung wird im Vergleich dazu eine um 54% höhere Ausbeute in derselben Festigkeitsklasse erreicht. Außerdem ist die Sortierung nach der Grenzwertkombination B, aufgrund der geringen Ausbeute von nur 3%, als wirtschaftlich nicht sinnvoll anzusehen.

Die unzureichenden Sortiererergebnisse der optimierten visuellen Sortierregeln hinsichtlich Ausbeute und erreichter mechanischer Eigenschaften gegenüber den Ergebnissen aus Kapitel 5.2.2, sind auf die geringeren Korrelationen zwischen den festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften und dem Sortiermerkmal DEK (siehe Tabelle 4-6) zurückzuführen. Die Korrelationen zwischen den mechanischen Kennwerten und den Sortiermerkmalen DEB, DAB und DSB im Zugkollektiv (siehe Tabelle 4-3) sind im Gegensatz dazu deutlich höher.

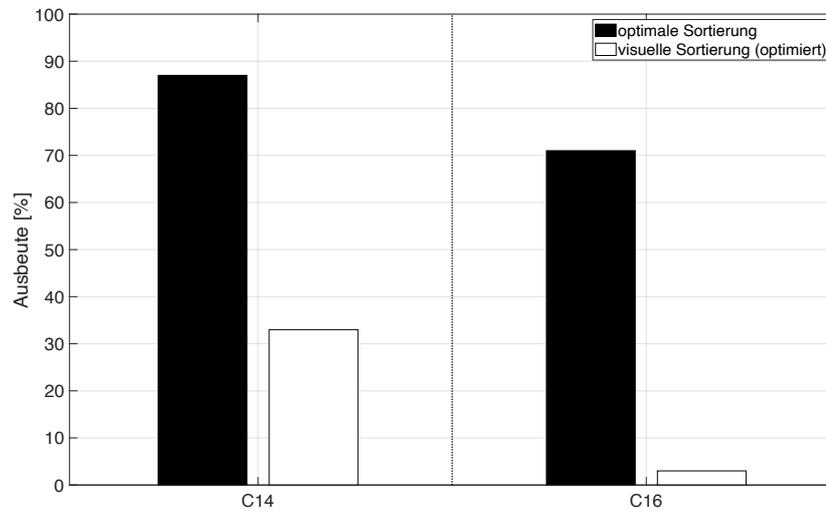


Abbildung 6-2: Ausbeuten und Biegefestigkeitsklassen der Sortierklassen, die mit den optimierten visuellen Sortierregeln erzielt werden, n = 95

6.3 Maschinelle Sortierung

Eine Auswahl von Ergebnissen der Sortierung nach den im Kapitel 3.7 beschriebenen Maschinensystemen ist in den Tabellen 6-4 bis 6-6 aufgeführt. Diese Tabellen enthalten Grenzwerte für die berechneten IP_s entsprechend der untersuchten Festigkeitsklassen sowie die charakteristischen Werte der Festigkeitsklassen. Tabelle 6-4 gibt Auskunft über die Ergebnisse mit $IP_1 (E_{dyn,12,i})$, Tabelle 6-5 über die Ergebnisse mit $IP_2 (E_{dyn,12,mean})$ und Tabelle 6-6 über die Ergebnisse mit $IP_3 (\rho_{12})$. In Tabelle B-3 in Anhang B sind die Ausbeuten von weiteren Klassenkombinationen auf Basis der maschinellen Sortierung aufgelistet.

Wie die Daten der Tabellen 6-4 bis 6-6 zeigen, werden die Festigkeitsklassen C24 und C27 durch die ausgewählten Maschinensysteme gegenüber der optimalen Sortierung nicht erreicht. Im Allgemeinen sind bei der maschinellen Sortierung des Biegekollektivs im Vergleich zum Zugkollektiv nur geringere Ausbeuten in den jeweiligen Festigkeitsklassen möglich. Dies ist, ähnlich wie bei den optimierten visuellen Sortierregeln (siehe Kapitel 6.2.2), auf die geringeren Korrelationen zwischen den festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften und den ausgewählten IP_s zurückzuführen. Im Gegensatz zur optimalen Sortierung ist hier die Biegefestigkeit die limitierende Eigenschaft bei der Zuordnung in die Festigkeitsklassen. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der maschinellen Sortierung des Zugkollektivs. Zur Erklärung wird die Sortierung in die Festigkeitsklasse C18 mit IP_2 in der Klassenkombinations-Nr. (3) herangezogen. Hier liegt der charakteristische Mittelwert des E-Moduls $E_{m,0,mean}$ mit 9,4 kN/mm² 9% über dem erforderlichen Wert aus Tabelle 3-2. Die charakteristische Rohdichte $\rho_{m,k}$ überschreitet den entsprechenden Grenzwert um 16%. Die charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,k}$ von 18,6 N/mm² wirkt begrenzend, da diese lediglich um 3% über dem erforderlichen charakteristischen Grenzwert aus Tabelle 3-2 liegt.

Tabelle 6-4: Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP_1 = E_{dyn,12,i}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Biegefestigkeitsklassenkombinationen, n = 95

Nummer Kombination	Grenzwert kN/mm ²	$f_{m,k}$ N/mm ²	$E_{m,0,mean}$ kN/mm ²	$\rho_{m,k}$ kg/m ³	Ausbeute –	C- Klasse
(1)	$IP_1 > 8,3$	15,2	8,7	371	0,48	C14
(2)	$IP_1 > 8,8$	16,3	9,0	377	0,43	C16
(3)	$IP_1 > 13,8$	18,9	10,0	491	0,04	C18
C18-C14	$IP_1 > 8,3$	14,7	8,6	387	0,44	C14
(4)	$IP_1 > -$	-	-	-	0,00	C22
C22-C14	$IP_1 > -$	-	-	-	0,00	C14

Tabelle 6-5: Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP_2 = E_{dyn,12,mean}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Biegefestigkeitsklassenkombinationen, n = 95

Nummer Kombination	Grenzwert kN/mm^2	$f_{m,k}$ N/mm^2	$E_{m,0,mean}$ kN/mm^2	$\rho_{m,k}$ kg/m^3	Ausbeute –	C- Klasse
(1)	$IP_2 > 8,2$	14,1	8,2	341	0,51	C14
(2)	$IP_2 > 8,4$	16,1	8,5	361	0,45	C16
(3)	$IP_2 > 9,9$	18,6	9,4	372	0,21	C18
C18-C14	$IP_2 > 8,2$	14,3	7,6	370	0,27	C14
(4)	$IP_2 > -$	-	-	-	0,00	C22
C22-C14	$IP_2 > -$	-	-	-	0,00	C14

Tabelle 6-6: Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP_3 = \rho_{12}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Biegefestigkeitsklassenkombinationen, n = 95

Nummer Kombination	Grenzwert kN/mm^2	$f_{m,k}$ N/mm^2	$E_{m,0,mean}$ kN/mm^2	$\rho_{m,k}$ kg/m^3	Ausbeute –	C- Klasse
(1)	$IP_3 > 475$	14,2	8,3	388	0,49	C14
(2)	$IP_3 > 502$	17,9	9,0	409	0,25	C16
(3)	$IP_3 > 520$	18,5	9,0	412	0,17	C18
C18-C14	$IP_3 > -$	-	-	-	0,00	C14
(4)	$IP_3 > 560$	22,4	9,8	453	0,09	C22
C22-C14	$IP_3 > 503$	15,4	8,3	428	0,16	C14

Die Ausbeuten der maschinellen Sortierung sind in Abbildung 6-3 den Ausbeuten der optimalen Sortierung gegenübergestellt. Die Ausbeuten der höchsten, auch ersten Klasse der Kombination wird in Abbildung 6-3 (a) dargestellt. Abbildung 6-3 (b) zeigt die Ausbeuten der niedrigsten Klasse in der Kombination und Abbildung 6-3 (c) die Gesamtausbeuten der jeweiligen Klassenkombinationen.

Nach Abbildung 6-3 (a) werden bei der Sortierung mit IP_2 grundsätzlich höhere Ausbeuten in der höchsten Klasse der Kombination erreicht als bei der Sortierung mit IP_1 und IP_3 . Auch die Gesamtausbeuten der untersuchten Klassenkombinationen aus Abbildung 6-3 (c) sind bei der Sortierung mit IP_2 höher als bei der Sortierung mit den restlichen Maschinensystemen. Bei der maschinellen Sortierung des Biegekollektivs können gegenüber den Ergebnissen aus Kapitel 5.3 auch Ausbeuten in den höheren Festigkeitsklassen durch die Sortierung mit IP_3 erreicht werden. Besonders hervorzuheben ist diesbezüglich, dass die höchste Klasse T22 nur durch dieses Maschinensystem erreicht wird. Die höchsten Ausbeuten verglichen mit den Ausbeuten der optimalen Sortierung aus Kapitel 6.1 werden in der Klassenkombination C18-C14 durch die Sortierung mit IP_1 und IP_2 erzielt. Dies ist vor allem auf die hohe Ausbeute in der niedrigsten Klasse der Kombination zurückzuführen.

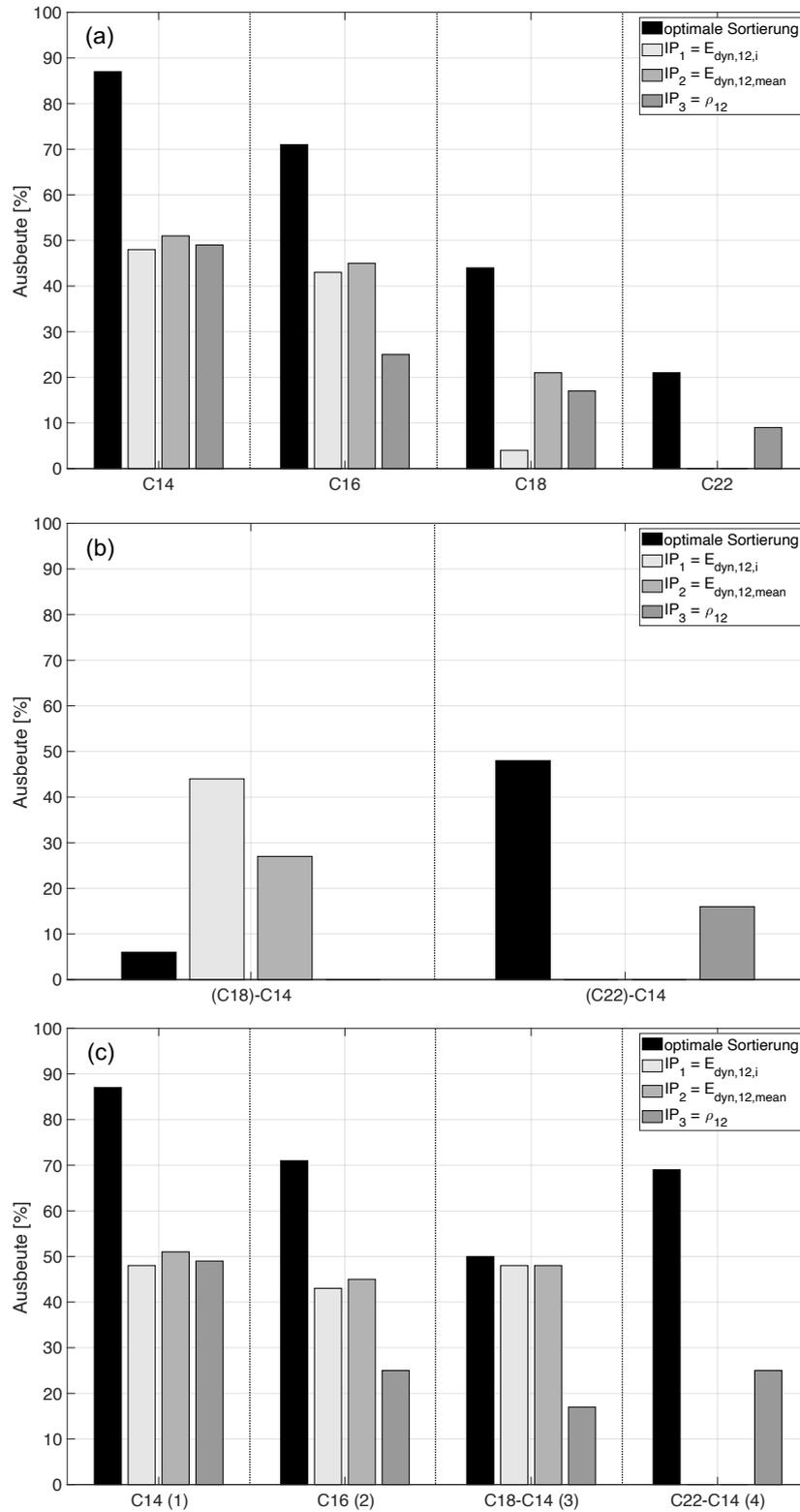


Abbildung 6-3: Ausbeuten der maschinellen Sortierung in ausgewählte Biegefestigkeitsklassenkombinationen für (a) höchste Klasse der Kombination (erste Klasse); (b) niedrigste Klasse der Kombination (zweite Klasse); (c) Gesamtausbeute der jeweiligen Klassenkombination, n = 95

6.4 Kombinierte maschinelle und visuelle Sortierung

Basierend auf den Erkenntnissen der vorherigen Sortiermethoden werden in diesem Kapitel neue Grenzwerte für eine Kombination aus visuellen und maschinellen Sortierparametern ermittelt. Untersucht werden dabei insgesamt 207 Grenzwertkombinationen aus einer Kombination von IP_1 und IP_2 mit dem visuellen Sortiermerkmal DEK. Tabelle 6-7 zeigt eine Auswahl von Grenzwertkombinationen der neuen Sortierklassen. In der Tabelle werden zusätzlich dazu die erreichten Festigkeitsklassen sowie die Ausbeuten der Sortierklassen aufgeführt. Weitere Grenzwertkombinationen sind in Tabelle B-4 in Anhang B zu finden. Wie Tabelle 6-7 zu entnehmen ist, wird die Sortierung mit den Grenzwertkombinationen B, E und H nicht durch das Sortiermerkmal DEK beeinflusst, da der maximal erfasste Einzelast nach Gleichung (3.29) bei 0,911 liegt.

Tabelle 6-7: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für ausgewählte Biegefestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter (IP_1 , IP_2 , DEK), $n = 95$

Grenzwertkombination	IP_1 kN/mm^2	IP_2 kg/m^3	DEK	Ausbeute	C-Klasse
A	9,0	-	0,9	0,38	C14
B	9,0	-	1,0	0,39	C16
C	12,0	-	0,4	0,03	C18
D	11,0	-	0,4	0,05	C20
E	-	500	1,0	0,27	C14
F	-	500	0,3	0,03	C16
G	-	550	0,8	0,08	C20
H	-	550	1,0	0,09	C22

In Tabelle 6-8 sind die charakteristischen Werte der Sortierklassen aus der kombinierten Sortierung dargestellt. Aus den charakteristischen Werten dieser Tabelle geht hervor, dass die Zuordnung zu einer Festigkeitsklasse stets durch die charakteristische Biegefestigkeit limitiert wird. Ähnlich wie bei der maschinellen Sortierung aus Kapitel 6.3 können bei einer kombinierten Sortierung des visuellen Sortiermerkmals mit IP_1 höhere Ausbeuten in den niedrigeren Festigkeitsklassen erreicht werden. Die Kombination des visuellen Sortiermerkmals mit IP_3 ermöglicht dagegen höhere Ausbeuten in den höheren Festigkeitsklassen. So wird beispielsweise bei der Sortierung in die Festigkeitsklasse C16 eine Ausbeute von 39% bei der Kombination des visuellen Sortiermerkmals mit IP_1 und eine Ausbeute von nur 3% bei der Kombination mit IP_3 erreicht. Bei der Sortierung in die Festigkeitsklasse C20 sind dagegen Ausbeuten von 5% bei der Kombination des visuellen Sortiermerkmals mit IP_1 und Ausbeuten von 8% bei der Kombination mit IP_3 möglich. Die höchste Festigkeitsklasse, die im Rahmen der kombinierten Sortierung erreicht wird, ist die Klasse C22 in der Grenzwertkombination H. Die Ausbeute von 9% in dieser Festigkeitsklasse ist jedoch mit dem Ergebnis aus Kapitel 6.3 vergleichbar, da in dieser Grenzwertkombination das visuelle Sortiermerkmal, wie eingangs erläutert, keine Auswirkung auf die Sortierung hat.

Tabelle 6-8: Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der aufgeführten Grenzwertkombinationen für ausgewählte Biegefestigkeitsklassen, n = 95

Grenzwert-kombination	$f_{m,k}$ N/mm^2	$E_{m,0,mean}$ kN/mm^2	$\rho_{m,k}$ kg/mm^3	Ausbeute	C-Klasse
A	15,9	8,9	393	0,38	C14
B	16,1	8,9	383	0,39	C16
C	18,4	10,8	416	0,03	C18
D	20,5	10,8	415	0,05	C20
E	15,7	8,8	410	0,27	C14
F	16,8	9,8	328	0,03	C16
G	21,9	9,7	472	0,08	C20
H	22,4	9,8	453	0,09	C22

In Abbildung 6-4 werden die Ausbeuten aus der kombinierten Sortierung mit den Ausbeuten aus der ersten Klasse der optimalen Sortierung aus Kapitel 6.1 verglichen. Im Allgemeinen zeigt die oben genannte Abbildung, dass besonders in den höheren Festigkeitsklassen – ab C18 – nur niedrige Ausbeuten durch die kombinierten Sortierregeln erreichbar sind. Im Durchschnitt werden um ca. 40% geringere Ausbeuten mit den kombinierten Sortierregeln als bei der optimalen Sortierung erreicht. Dies ist auf die in Kapitel 6.2.2 erläuterten Gründe der visuellen Sortierung zurückzuführen. Die höchste Ausbeute im Vergleich zur optimalen Sortierung ist bei der Sortierung mit der Grenzwertkombination B möglich. Die Ausbeute liegt hier um ca. 30% unter der Ausbeute aus der optimalen Sortierung.

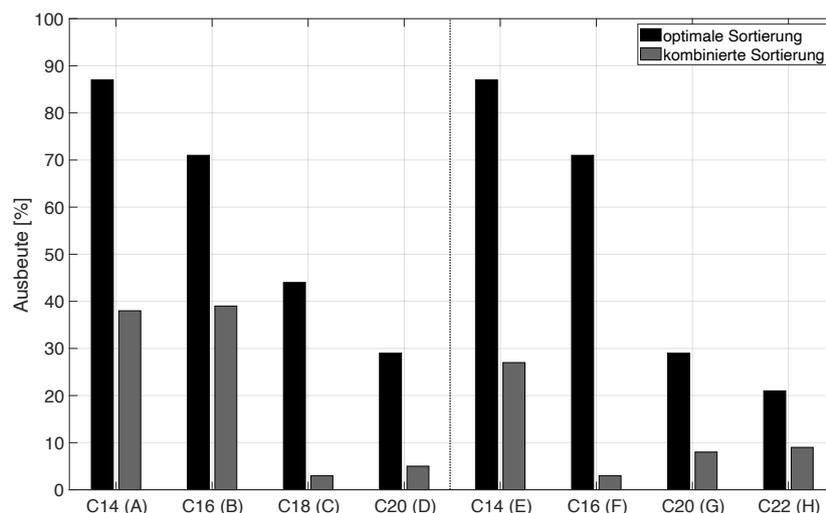


Abbildung 6-4: Ausbeuten und Biegefestigkeitsklassen der Sortierklassen, die mit den kombinierten Sortierregeln erzielt werden, n = 95

6.5 Vergleich der Sortiermethoden

Abbildung 6-5 zeigt eine Auswahl an Ausbeuten verschiedener Biegefestigkeitsklassen, die mithilfe der Sortiermethoden aus Kapitel 6.2 bis 6.4 erreicht wurden. In der Abbildung werden dabei die Ausbeuten in der höchsten Klasse der untersuchten Kombinationen dargestellt. Hinsichtlich der kombinierten Sortiermethode werden die maximalen Ausbeuten der jeweiligen Kombinationen angegeben. In den Festigkeitsklassen C14 bis C18 sind dies die Ausbeuten aus der Kombination des visuellen Sortiermerkmals DEK mit IP_1 und in der Festigkeitsklasse C22 die Kombination mit IP_3 . In Abbildung 6-5 sind, um die Wirtschaftlichkeit eines Sortierverfahrens beurteilen zu können, zusätzlich die Ausbeuten aus der optimalen Sortierung aufgeführt.

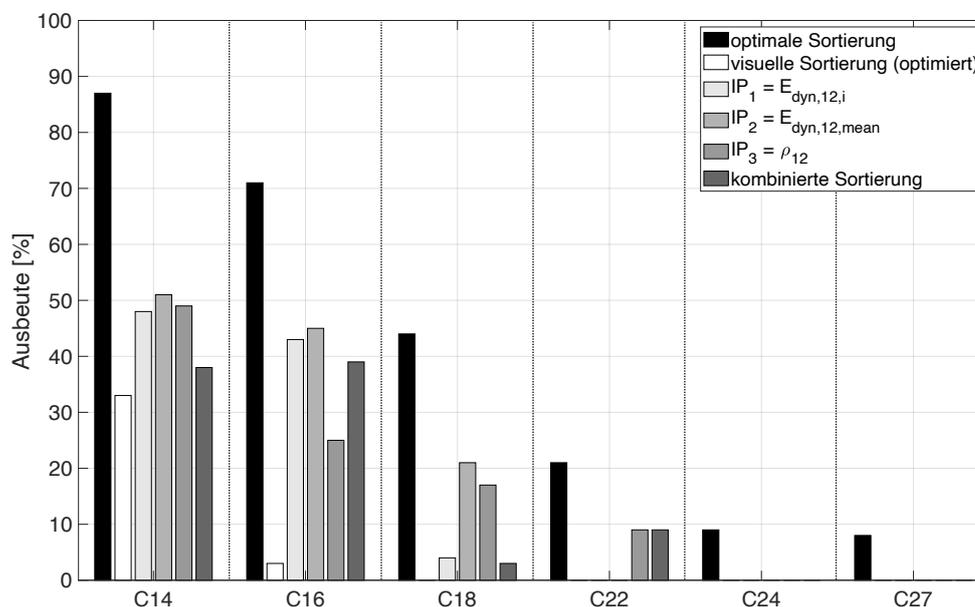


Abbildung 6-5: Auswahl an Ausbeuten verschiedener Biegefestigkeitsklassen, die mit den Sortiermethoden (optimale Sortierung, visuelle Sortierung (optimiert), $IP_1 = E_{dyn,12,i}$, $IP_2 = E_{dyn,12,mean}$, $IP_3 = \rho_{12}$, kombinierte Sortierung) erreicht werden. Festigkeitsklassen in der höchsten Klasse der untersuchten Kombinationen; $n = 95$

Im Allgemeinen werden die Festigkeitsklassen C24 und C27 aus der optimalen Sortierung durch keine der fünf untersuchten Sortiermethoden erreicht. Die höchsten Ausbeuten sind durch die maschinellen Sortiermethoden aus Kapitel 6.3 möglich. In den Festigkeitsklassen von C14 bis C18 kann die Sortierung mit IP_2 als am effizientesten hinsichtlich Ausbeute und erreichter charakteristischer Werte, angesehen werden. Die höchste Festigkeitsklasse C22 wird durch die Sortierung mit IP_3 und den kombinierten Sortierregeln erreicht. Da das visuelle Sortiermerkmal bei der kombinierten Sortiermethode in dieser Festigkeitsklasse jedoch keinen Einfluss auf die Sortierung hat, sind die Ausbeuten der unterschiedlichen Sortiermethoden in der Klasse C22 identisch.

Aufgrund der geringen Korrelation des visuellen Sortiermerkmals DEK mit den festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften (siehe Tabelle 4-6) können mit den optimierten visuellen Sortierregeln aus Kapitel 6.2.2 grundsätzlich nur geringe Ausbeuten in den unteren Festigkeitsklassen erreicht

werden. Somit liegen die Ausbeuten der visuellen Sortiermethode bei allen untersuchten Festigkeitsklassen unter den erzielten Ausbeuten der maschinellen Sortierung. Infolgedessen sind auch bei der kombinierten Sortierung nur geringe Ausbeuten im Vergleich zur maschinellen Sortiermethode möglich.

7 Vergleich der Festigkeitsprofile aus Zug- und Biegefestigkeit

7.1 Umrechnung von charakteristischer Biegefestigkeit in charakteristische Zugfestigkeit

Das Verhältnis zwischen charakteristischer Zug- und Biegefestigkeit wird anhand von gruppierten Daten, sowohl von ideal sortierten als auch von visuell und maschinell sortierten Prüfkörpern, analysiert. Das Verhältnis basiert auf insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfergebnissen (siehe Kapitel 4).

Anhand des Regressionsmodells aus Abbildung 7-1 der visuell und maschinell sortierten Datengruppen, kann die charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,k}$ nach Gleichung (7.1) in die charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ umgerechnet werden.

$$f_{t,0,k} = 0,096 + 0,503 \cdot f_{m,k} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (7.1)$$

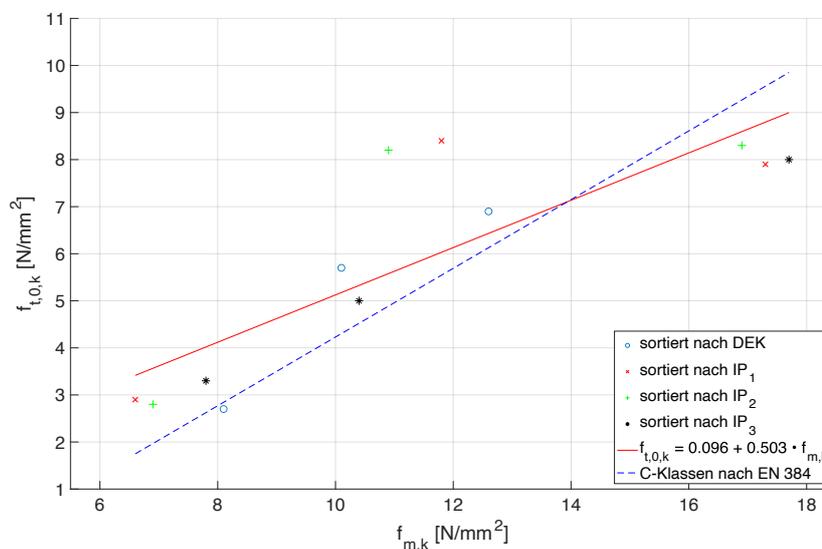


Abbildung 7-1: Verhältnis zwischen Biege- und Zugfestigkeit für Daten in Gruppen von mind. 20 Prüfkörpern, sortiert nach visuellen und maschinellen Sortierparametern (DEK, IP_1 , IP_2 , IP_3). Verhältnis basierend auf insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfungen.

Die Umrechnungsgleichung der ideal sortierten Prüfkörper zeigt Abbildung 7-2. Da bei diesem Sortieransatz Datengruppen unterschiedlicher Qualität gebildet werden, wird die Aussage von Burger et. al [59] aus Kapitel 3.9 nicht eingehalten. Daher wird auf diesen Umrechnungsansatz hier nicht genauer eingegangen.

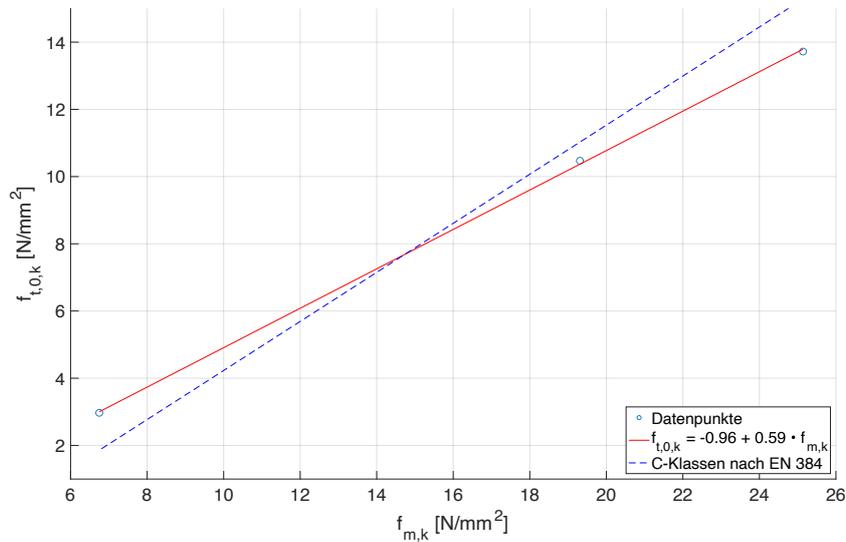


Abbildung 7-2: Verhältnis zwischen Biege- und Zugfestigkeit für Daten in Gruppen von 30 Prüfkörpern, ideal sortiert nach der Festigkeit. Verhältnis basierend auf insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfungen.

Die unter Verwendung von Gleichung (7.1) ermittelten charakteristischen Zugfestigkeitswerte sind in Tabelle 7-1 den charakteristischen Zugfestigkeitswerten aus EN 384 [4] gegenübergestellt. In der Tabelle wird sich auf ausgewählte Biegefestigkeitsklassen beschränkt. Wie aus Tabelle 7-1 hervorgeht, überschätzt die Gleichung (3.40) aus der oben genannten Norm die Umrechnung von der charakteristischen Biegefestigkeit in die charakteristische Zugfestigkeit. In der niedrigsten Biegefestigkeitsklasse C14 unterscheiden sich die berechneten charakteristischen Zugfestigkeiten beider Umrechnungsformeln nur marginal. Beispielsweise wird hier durch Gleichung (7.1) eine charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ von 7,1 N/mm² und durch die Gleichung (3.40) eine charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ von 7,2 N/mm² erreicht. Erst in den höheren Biegefestigkeitsklassen, wie zum Beispiel in der Klasse C30 oder C35, wird die Überschätzung aus der Umrechnungsgleichung (3.40) der Norm deutlich. So liegt in der Klasse C35 die charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ nach Gleichung (7.1) zum Beispiel bei 17,7 N/mm² und die charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ nach Gleichung (3.40) bei 30,5 N/mm². Aus Tabelle 7-1 ergibt sich zudem ein mittleres Festigkeitsverhältnis $f_{t,0,k}/f_{m,k}$ von 0,50 der visuell und maschinell sortierten Datengruppen.

Tabelle 7-1: Charakteristische Zugfestigkeitswerte [N/mm²] in Abhängigkeit von ausgewählten Biegefestigkeitsklassen, die unter Verwendung der Gleichung aus EN 384 [30] ($f_{t,0,k} = -3,07 + 0,73 \cdot f_{m,k}$) und der in der aktuellen Arbeit abgeleiteten Gleichung ($f_{t,0,k} = 0,096 + 0,503 \cdot f_{m,k}$) ermittelt werden.

$f_{m,k} \rightarrow f_{t,0,k}$	Biegefestigkeitsklassen zu Zugfestigkeitswerten						
	C14	C16	C18	C20	C22	C30	C35
EN 384 - Gleichung (3.40)	7,2	8,5	10,0	11,5	13,0	29,0	30,5
aktuelle Arbeit - Gleichung (7.1)	7,1	8,1	9,2	10,2	11,2	15,2	17,7

7.2 Umrechnung von charakteristischer Zugfestigkeit in charakteristische Biegefestigkeit

Die umgekehrte Umrechnung, also von charakteristischer Zugfestigkeit in charakteristische Biegefestigkeit, erfolgt nach derselben Methode wie in Kapitel 7.1. Die insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfresultate aus Kapitel 4 werden dafür ebenfalls ideal sowie visuell und maschinell in unterschiedliche Datengruppen sortiert.

Mithilfe der Regressionsanalyse aus Abbildung 7-3 der visuell und maschinell sortierten Datengruppen lässt sich die charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ gemäß Gleichung (7.2) in die entsprechende charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,k}$ umwandeln.

$$f_{m,k} = 3,215 + 1,405 \cdot f_{t,0,k} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (7.2)$$

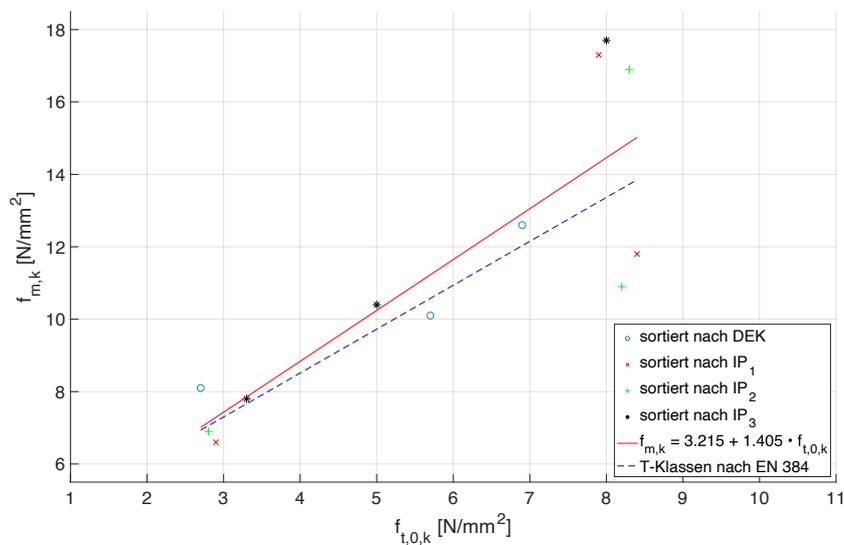


Abbildung 7-3: Verhältnis zwischen Zug- und Biegefestigkeit für Daten in Gruppen von mind. 20 Prüfkörpern, sortiert nach visuellen und maschinellen Sortierparametern (DEK, IP_1 , IP_2 , IP_3). Verhältnis basierend auf insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfungen.

Die Umrechnungsgleichung für die ideal sortierten Prüfkörper ist in Abbildung 7-4 dargestellt. Bei diesem Sortieransatz werden jedoch Datengruppen unterschiedlicher Qualität gebildet. Somit wird die Aussage von Burger et. al [59] aus Kapitel 3.9 bezüglich der Abhängigkeit der Festigkeitsverhältnisse von der Holzqualität nicht eingehalten. Dieser Umrechnungsansatz wird aus diesem Grund hier nicht weiter berücksichtigt.

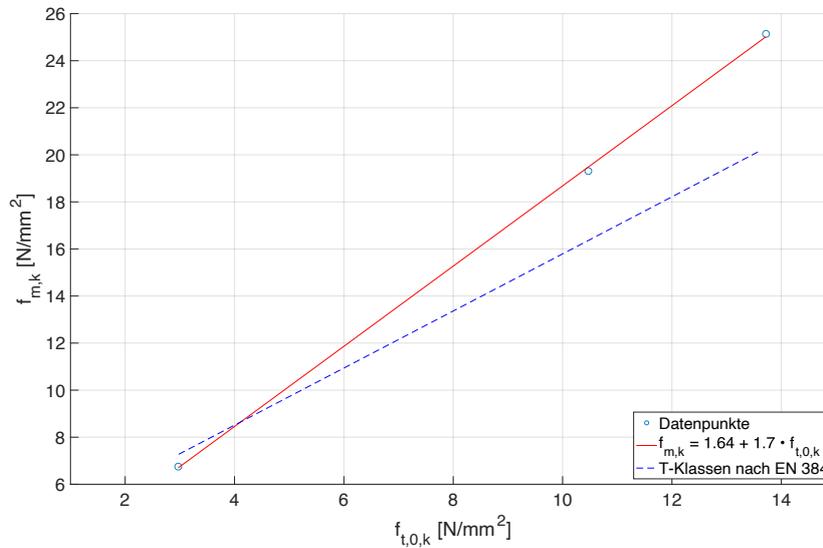


Abbildung 7-4: Verhältnis zwischen Zug- und Biegefestigkeit für Daten in Gruppen von 30 Prüfkörpern, ideal sortiert nach der Festigkeit. Verhältnis basierend auf insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfungen.

In Tabelle 7-2 ist ein Vergleich der berechneten charakteristischen Biegefestigkeiten auf Grundlage von Gleichung (7.2) und Gleichung (3.41) für ausgewählte Zugfestigkeitsklassen zu sehen. Diese Gegenüberstellung zeigt, dass die Gleichung (3.41) aus EN 384 [30] die tatsächliche Biegefestigkeit von tansanischem Kiefernholz unterschätzt. So liegt beispielsweise die charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,k}$ in der Festigkeitsklasse T8 nach Gleichung (7.2) bei 14,5 N/mm² und nach Gleichung (3.41) bei 13,5 N/mm². Außerdem ergibt sich aus Tabelle 7-2 ein Festigkeitsverhältnis $f_{t,0,k}/f_{m,k}$ der visuell und maschinell sortierten Datengruppen von 0,55 in der Festigkeitsklasse T8 bis 0,64 in der Klasse T22.

Weitere Festigkeitsverhältnisse, basierend auf den Grenzwerten aus der maschinellen Sortierung des Zug- und Biegekollektivs sind in Tabelle C-1 und Tabelle C-2 in Anhang C dargestellt. Das durchschnittliche Festigkeitsverhältnis $f_{t,0,k}/f_{m,k}$ liegt dort bei etwa 0,55.

Tabelle 7-2: Charakteristische Biegefestigkeitswerte [N/mm²] in Abhängigkeit von ausgewählten Zugfestigkeitsklassen, die unter Verwendung der Gleichung aus EN 384 [30] ($f_{m,k} = 3,66 + 1,213 \cdot f_{t,0,k}$) und der in der aktuellen Arbeit abgeleiteten Gleichung ($f_{m,k} = 3,215 + 1,405 \cdot f_{t,0,k}$) ermittelt werden.

$f_{t,0,k} \rightarrow f_{m,k}$	Zugfestigkeitsklassen zu Biegefestigkeitswerten						
	T8	T9	T10	T11	T12	T21	T22
EN 384 - Gleichung (3.41)	13,5	14,5	16,0	17,0	18,0	19,0	22,5
aktuelle Arbeit - Gleichung (7.2)	14,5	15,9	17,3	18,7	20,1	32,7	34,1

8 Diskussion

Vergleich der mechanischen Kennwerte von tansanischem und europäischem Kiefernholz

Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von tansanischem (*Pinus patula*) und europäischem (*Pinus sylvestris*) Kiefernholz werden im Folgenden mithilfe der Daten aus der Literaturrecherche (siehe Kapitel 2.3.1) und den in dieser Arbeit ermittelten Kennwerten (siehe Kapitel 4) miteinander verglichen. Der Vergleich erfolgt auf Grundlage der unsortierten Grundgesamtheit.

Die Prüfergebnisse im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass tansanisches Kiefernholz grundsätzlich niedrigere mechanische und physikalische Eigenschaften als europäisches Kiefernholz aufweist. Sowohl die mittlere Zug- als auch Biegefestigkeit von europäischem Kiefernholz ist fast doppelt so hoch wie die von tansanischem Kiefernholz. Beispielsweise liegt die mittlere Zugfestigkeit aus Kapitel 4.1 für tansanisches Kiefernholz bei $14,1 \text{ kN/mm}^2$ und die mittlere Zugfestigkeit aus Kapitel 2.3.1 für europäisches Kiefernholz bei $25,7 \text{ kN/mm}^2$. Die Steifigkeitswerte der beiden Kiefernholzarten unterscheiden sich jedoch nicht so stark wie die Festigkeitswerte. Die Zug- und Biegesteifigkeitswerte von europäischem Kiefernholz liegen im Mittel um ca. 35% über den Steifigkeitskennwerten des geprüften tansanischen Kiefernholzes. Für das tansanische Kiefernholz wird zum Beispiel ein mittlerer Biege-E-Modul von $6,9 \text{ N/mm}^2$ (siehe Kapitel 4.2.1) ermittelt. Im Vergleich dazu liegt der mittlere Biege-E-Modul für das europäische Kiefernholz aus Kapitel 2.3.1 bei $10,8 \text{ N/mm}^2$. Bei dem Vergleich der Rohdichten beider Kiefernholzarten fällt auf, dass die mittlere Rohdichte von europäischem Kiefernholz durchschnittlich um 60 kg/m^3 höher ist als die von tansanischem Kiefernholz. Dies entspricht etwa 14 %.

Auch die charakteristischen Werte der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften von tansanischem Kiefernholz liegen unter denen des europäischen Kiefernholzes. Wie in den Ergebnissen aus Kapitel 4 erläutert, beträgt die charakteristische Zugfestigkeit von tansanischem Kiefernholz $4,8 \text{ N/mm}^2$ und die charakteristische Biegefestigkeit $9,7 \text{ N/mm}^2$. Im Vergleich dazu liegt die gemittelte charakteristische Zugfestigkeit von Kiefernholz aus unterschiedlichen europäischen Herkunftsländern bei $12,7 \text{ N/mm}^2$ und die gemittelte charakteristische Biegefestigkeit bei $20,5 \text{ N/mm}^2$. Der größte Unterschied zwischen den charakteristischen Werten der beiden Kiefernholzarten wird beim Vergleich der Rohdichten festgestellt. Bei europäischem Kiefernholz liegt die charakteristische Rohdichte im Durchschnitt bei 428 kg/m^3 (siehe Kapitel 2.3.1). Bei dem untersuchten tansanischen Kiefernholz liegt diese hingegen nur bei durchschnittlich 288 kg/m^3 (siehe Kapitel 4).

Die Streuungen – hier interpretiert über den Variationskoeffizient (VK) – der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften der beiden Kiefernholzarten sind grundsätzlich ähnlich. Sowohl bei tansanischem als auch bei europäischem Kiefernholz streuen die Festigkeitswerte, gefolgt von den Steifigkeitswerten und der Rohdichte, am stärksten. Die Festigkeits- und Steifigkeitswerte von tansanischem Kiefernholz streuen im Durchschnitt um ca. 12% mehr als die von europäischem Kiefernholz. Besonders hervorzuheben ist, dass tansanisches Kiefernholz eine fast doppelt so hohe Streuung der Rohdichte aufweist wie das europäische Kiefernholz. Dies begründet auch den enormen Unterschied zwischen den charakteristischen Rohdichtewerte der beiden Kiefernholzarten.

Die niedrigen mechanischen Kennwerte der tansanischen Kiefernholzart sind vor allem auf die vergleichsweise kurzen Umtriebszeiten, große Gesamstastflächen, aber auch auf die hohen Rohdichteschwankungen zurückzuführen. Wie in Kapitel 3.1 erwähnt, beträgt die mittlere Umtriebszeit der untersuchten tansanischen Prüfkörper 14 Jahre. Die in Kontinentaleuropa wachsenden Kiefernholzarten werden nach Schütt et al. [31] im Vergleich dazu erst nach etwa 80 Jahren geerntet. Durch die kurzen Umtriebszeiten des tansanischen Kiefernholzes wird vor allem das Wachstum des Spätholzanteils eingeschränkt, welches höhere mechanische Eigenschaften aufweist und somit maßgeblich für die Leistungsfähigkeit einer Holzart ist [60]. Die mittlere Gesamstastfläche (TKA) nach der visuellen Sortierung (siehe Kapitel 5.2.1 und 6.2.1) liegt für das tansanische Kiefernholz bei 0,42. Im Vergleich dazu beträgt die gemittelte Gesamstastfläche von europäischem Kiefernholz aus der Arbeit von Ranta-Maunus et al. [25] etwa 0,26. Somit liegt die mittlere Gesamstastfläche von tansanischem Kiefernholz um etwas mehr als 60% über der des europäischen Kiefernholzes. Bei der Beurteilung dieser Werte ist jedoch zu beachten, dass die Aufnahme der visuellen Sortiermerkmale in dieser Masterarbeit auf den prüfrelevanten Bereich, mit hohen Ästigkeiten, beschränkt wurde. Die Gegenüberstellung der mittleren Jahrringbreite der beiden Holzarten zeigt, dass tansanisches Kiefernholz eine etwa 8 mm höhere mittlere Jahrringbreite aufweist als europäisches Kiefernholz. Die größeren Jahrringbreiten sind grundsätzlich auf das enorme Wachstum der Bäume zu Beginn ihrer Lebensphase, bedingt durch die idealen Wuchsbedingungen auf der Plantage (siehe Kapitel 3.1) zurückzuführen.

Der geringste Unterschied, bezogen auf mechanische und physikalische Eigenschaften, zur untersuchten tansanischen Kiefernholzart, kann bei Kiefernholz aus dem Vereinigten Königreich bzw. der Republik Irland festgestellt werden. Im Rahmen der Literaturrecherche (siehe Kapitel 2.3.1) wurden hier die niedrigsten charakteristischen Werte der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften von *Pinus sylvestris* ermittelt. Auch das Verhältnis von Zug- zu Biegefestigkeit der beiden Kiefernholzarten ist vergleichbar. Das mittlere Festigkeitsverhältnis von visuell und maschinell sortierten tansanischem Kiefernholz (siehe Kapitel 7) beträgt, bestimmt aus der Umrechnung von Biege- zu Zugfestigkeit, etwa 0,5. Gil-Moreno et al. [37] ermittelten demgegenüber ein Verhältnis von 0,55 an Kiefernholz aus dem Vereinigten Königreich und der Republik Irland.

Vergleich der mechanischen Kennwerte von *Pinus patula* mit dem aktuellen Stand des Wissens zu afrikanischem Kiefernholz

Grundsätzlich werden die niedrigen mechanischen und physikalischen Eigenschaften von afrikanischem Kiefernholz aus der Literatur (siehe Kapitel 2.3.2) durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt. Die Mittelwerte der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften aus Kapitel 4.1 und 4.2 liegen innerhalb der in Kapitel 2.3.2 angegebenen Spannweiten. Die 5%-Quantile der Zug- und Biegefestigkeiten dieser Arbeit liegen jedoch im Durchschnitt um ca. 3 N/mm² unter den in der Literatur genannten minimalen 5%-Quantile [44], [41]. Auch die in der Literatur genannten Schwierigkeiten hinsichtlich Verdrehung, Quer- und Längskrümmung bei der visuellen Sortierung von *Pinus patula* werden im Rahmen dieser Arbeit bestätigt. Hervorzuheben ist, dass die mittlere Verdrehung der untersuchten Prüfkörper um etwa 10 mm höher ist, als die von Dowse [44] ermittelte durchschnittliche Verdrehung von ca. 2 mm.

Da in der Arbeit von Burdzik [41] die visuelle Sortierung nach SANS 1783-2 [39] durchgeführt wurde, eignet sich diese nur bedingt zum Vergleich der Ergebnisse der aktuellen Arbeit. Sowohl die Ergebnisse von Burdzik [41] als auch die Ergebnisse dieser Arbeit (siehe Kapitel 5.2 und 6.2) zeigen, dass durch die visuelle Sortierung von afrikanischem Kiefernholz lediglich die unteren Festigkeitsklassen nach EN 338 [4] erreicht werden können. Des Weiteren liegen die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte der beiden Arbeiten in derselben Größenordnung. Auch die Rohdichten der beiden Arbeiten sind mit 457 kg/m^3 aus der Literatur und 427 kg/m^3 aus der aktuellen Arbeit ähnlich.

Eine bessere Vergleichbarkeit zur vorliegenden Arbeit ermöglicht die Arbeit von Mwamakimullah et al. [43]. Da die Prüfkörper in dieser Arbeit aus derselben Plantage stammten wie die der vorliegenden Arbeit, musste auch dort ein ähnlicher Anteil, etwa 15% der Grundgesamtheit, aufgrund von Qualitätsansprüchen für die Prüfung aussortiert werden. Die mittleren Zugfestigkeiten der unsortierten Grundgesamtheit beider Arbeiten unterscheiden sich nur um $0,2 \text{ N/mm}^2$. Die Mittelwerte der Biegefestigkeiten sind jedoch nicht miteinander vergleichbar. So wird von Mwamakimullah et al. [43] eine mittlere Biegefestigkeit der unsortierten Grundgesamtheit von $40,9 \text{ N/mm}^2$ (siehe Kapitel 2.3.2) angegeben. In der aktuellen Arbeit wird jedoch nur eine mittlere Biegefestigkeit von $25,2 \text{ N/mm}^2$ (siehe Kapitel 4.2.1) erreicht. Die mittleren Steifigkeitskennwerte der beiden Arbeiten unterscheiden sich ebenfalls deutlich. Hierfür können möglicherweise die unterschiedlichen Prüfaufbauten als ursächlich angesehen werden. Außerdem wurde die Verformungsmessung von Mwamakimullah et al. [43] lediglich mit einem analogen Messschieber durchgeführt, was zum Beispiel durch fehlerhaftes Ablesen zu ungenaueren Messergebnissen führen könnte.

Im Gegensatz zu den oben genannten Forschungen wurden von Dowse [44] neben zerstörenden zusätzlich auch zerstörungsfreie Prüfmethode angewandt. Die mittleren Rohdichten und dynamischen E-Module nach Dowse [44] und dieser Masterarbeiten liegen in derselben Größenordnung. Von Dowse [44] werden diesbezüglich 428 kg/m^3 für die mittlere Rohdichte und $8,7 \text{ kN/mm}^2$ für den mittleren dynamischen E-Modul genannt. Im Vergleich dazu wird in der aktuellen Arbeit eine mittlere Rohdichte von 431 kg/m^3 und ein mittlerer dynamischer E-Modul von $8,5 \text{ kN/mm}^2$ ermittelt. Auch die mittleren Jahrringbreiten der beiden Arbeiten unterscheiden sich nur um einen Millimeter. In der Arbeit von Dowse [44] wurde außerdem eine um ca. $5,0 \text{ N/mm}^2$ höhere mittlere Biegefestigkeit als bei der aktuellen Arbeit ermittelt. Die mittleren Zugfestigkeiten nach Dowse [44] und der vorliegenden Arbeiten sind mit einem Unterschied von nur ca. $2,0 \text{ N/mm}^2$ jedoch vergleichbar. Die in der Literatur genannte geringfügig höhere Biegefestigkeit ist auf eine zufällige Anordnung der querschnittschwächsten Stelle im Prüfbereich zurückzuführen. In der aktuellen Arbeit wurde die querschnittschwächste Stelle in Anlehnung an EN 408 [3] dagegen überwiegend mittig unter den Lasteinleitungspunkten platziert.

Des Weiteren sind die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von *Pinus patula* aus Tansania vergleichbar mit den Ergebnissen aus der Arbeit von Van de Merwe et al. [45] bezüglich *Pinus patula* aus der Provinz Mpumalanga, Südafrika. Von Van de Merwe et al. [45] wurden ähnliche mechanische Kennwerte in der Anbauregion *Highveld* (Granitböden) sowie in der Höhenlage von 1100 - 1299 m ü. NN. ermittelt wie in der aktuellen Arbeit (siehe Kapitel 4.2.1). Die dynamischen E-Module beider Arbeiten sind nahezu identisch. Jedoch dokumentieren Van de Merwe et al. [45] eine um ca.

3,0 N/mm² höhere Biegefestigkeit der Hölzer aus der oben genannten Anbauregion und Höhenlage. Die Rohdichte aus der Literatur von Van de Merwe et al. [45] ist außerdem im Durchschnitt um 12 kg/m³ geringer als die ermittelte Rohdichte von 431 kg/m³ in der aktuellen Arbeit.

Vergleich der nationalen Sortiernormen: DIN 4074-1 [6], SANS 1783-2 [39] und TZS 387 [14]

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher nationaler Sortiernormen für die Sortierung von *Pinus patula* aus Tansania werden die Ergebnisse aus der Studie von Mwamakimbullah et al. [43] mit den Ergebnissen aus dieser Masterarbeit verglichen. Grundsätzlich können die Sortierklassen, die nach den Sortiermerkmalen und Grenzwerten aus DIN 4074-1 [6] sortiert wurden, in keine Festigkeitsklasse nach EN 338 [4] eingeordnet werden. Erst durch die Optimierung der visuellen Sortierregeln wie in Kapitel 6.2.2 kann beispielsweise die Festigkeitsklasse C14 mit einer Ausbeute von 33% des gesamten Biegekollektivs erreicht werden. Die Festigkeitsklasse C24 wird von keiner Sortierklasse nach den optimierten visuellen Sortierregeln aus Kapitel 6.2.2 erreicht.

Im Gegensatz dazu können bei der Arbeit von Mwamakimbullah et al. [43] rund 32% der Prüfkörper des gesamten Biegekollektivs, welche nach TZS 387 [14] sortiert wurden, der Festigkeitsklasse C24 zugeordnet werden. Die Sortierung nach SANS 1783-2 [39] weist dagegen eine geringere Ausbeute von nur 12% in der Sortierklasse S7 auf, welche der Festigkeitsklasse C24 zugeordnet werden kann. Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass die visuelle Sortierung von *Pinus patula* aus Tansania nach TZS 387 [14] hinsichtlich Ausbeute und erreichter charakteristischer Werte in der Festigkeitsklasse C24 effizienter ist als eine Sortierung nach SANS 1783-2 [39] oder DIN 4074-1 [6].

Vergleich der Sortiermethoden auf Grundlage der Zug- und Biegeprüfungen

Die unterschiedlichen Sortiermethoden aus Kapitel 5 und 6 zeigen, dass bei der Zuordnung in die Festigkeitsklassen nach EN 338 [4] überwiegend die charakteristische Festigkeit die limitierende Eigenschaft ist. Grundsätzlich werden bei der Sortierung des Zugkollektivs höhere Festigkeitsklassen als bei der Sortierung des Biegekollektivs erreicht. Dies liegt vor allem an der höheren Korrelation zwischen den festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften und den Sortierparametern des Zugkollektivs (siehe Kapitel 4.1).

Die höchsten Ausbeuten in den ausgewählten Festigkeitsklassen werden mit den maschinellen Sortiermethoden nach IP_1 , IP_2 , und IP_3 , erzielt. Dies bestätigen auch die Ergebnisse aus der Literatur in Kapitel 2.1. Im Gegensatz zur visuellen Sortierung kann das Kiefernholz hier außerdem in mehr als eine Festigkeitsklasse eingeordnet werden. Daher sollte in zukünftigen Arbeiten untersucht werden, ob und wie sich der Ausschuss bei der visuellen Sortierung in weitere Festigkeitsklassen einteilen lässt. Im Allgemeinen eignet sich die Sortierung nach IP_3 in den höheren Zugfestigkeitsklassen nicht, jedoch wird die höchste Biegefestigkeitsklasse C22 nur mit diesem Maschinensystem erreicht. Aus dem Vergleich der ersten beiden Maschinensysteme wird deutlich, dass durch die Sortierung mit IP_1 im Zugkollektiv (siehe Kapitel 5.5) und durch die Sortierung mit IP_2 im Biegekollektiv (siehe Kapitel 6.5) die höchsten Ausbeuten in den ausgewählten Festigkeitsklassen erreicht werden können. Die Ausbeuten der beiden IPs unterschieden sich in den höheren Zugfestigkeitsklassen jedoch nur marginal.

Werden die Prüfkörper nach den visuellen und kombinierten Sortierregeln sortiert, so liegen die Ausbeuten grundsätzlich unter den Ausbeuten aus der maschinellen Sortierung. Erwähnenswert ist jedoch, dass die höchste Zugfestigkeitsklasse T22 nur durch die Sortierung nach den kombinierten Sortierregeln erreicht werden kann. Außerdem ist aufgrund der niedrigen mechanischen Eigenschaften des Kiefernholzes aus Kapitel 4 eine Einführung von zusätzlichen Festigkeitsklassen bei der visuellen Sortierung von *Pinus Patula* aus Tansania nicht sinnvoll. Wie sich jedoch die visuelle Sortierung mit einem genetischen Algorithmus, wie beispielsweise dem *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA II) aus der Forschung von Deb et al. [61] verhält, ist in weiteren Untersuchungen zu prüfen.

Vor dem Hintergrund der unmittelbaren praktischen Anwendbarkeit der Sortiermethoden in Tansania, wird für die Festigkeitssortierung von *Pinus patula* das zweite Maschinensystem empfohlen. Somit kann auf das zeitintensive Bestimmen der visuellen Sortiermerkmale sowie der Rohdichte zur Berechnung des dynamischen E-Moduls nach IP_1 verzichtet werden. Außerdem weist das zweite Maschinensystem gewisse finanzielle Vorteile im Vergleich zu den restlichen Sortiermethoden auf. So sind hier beispielsweise keine hohen Anschaffungskosten von Maschinen mit Durchstrahlungs- oder Bildverarbeitungsverfahren erforderlich (siehe Kapitel 2.1). Für die Sortierung von *Pinus patula* aus Tansania kann somit ein handelsüblicher *Mechanical Timber Grader* (MTG) verwendet werden. Dieses Handprüfgerät ermittelt den dynamischen E-Modul über die Eigenfrequenzmessung anhand einer voreingestellten Rohdichte [62]. Für die Einstellung des Prüfgeräts wird eine mittlere Rohdichte von 460 kg/m^3 empfohlen.

Verwendung von tansanischem Kiefernholz für tragende Zwecke

Das Potential der tansanischen Kiefernholzart *Pinus patula* für tragende Zwecke ist angesichts seiner niedrigeren mechanischen und physikalischen Eigenschaften im Vergleich zu europäischem Kiefernholz grundsätzlich als begrenzt anzusehen. Da die in dieser Arbeit vorgestellten Sortiermethoden eine Grundlage für weitere mögliche Forschungsarbeiten darstellen, wird das Potential der tansanischen Kiefernholzart für tragende Zwecke anhand der Ergebnisse der optimalen Sortierung beurteilt.

Wie die Ergebnisse der optimalen Sortierung aus Kapitel 5.1 und 6.1 zeigen, werden nur geringe Ausbeuten für die Festigkeitsklassen T14 beziehungsweise C24 von jeweils ca. 10% erreicht. Die Hölzer dieser Festigkeitsklassen werden in der Baubranche vorrangig für die Herstellung von Vollholz-Querschnitten verwendet. Da aber nach Colling [24] auch die gängigste BSH-Festigkeitsklasse GL24h aus diesen Festigkeitsklassen besteht, wurde in dieser Arbeit die Festigkeitsklassenkombination des kombinierten Querschnittsaufbaus GL24c genauer untersucht. Nach EN 14080 Tabelle 2 [26] sind hier die Festigkeitsklassen T9 beziehungsweise C16 zu 34% des Gesamtquerschnittes im Lamellenkern zulässig. Die Randbereiche, also jeweils 33% des kombinierten Querschnittes, müssen dabei weiterhin aus den Festigkeitsklassen T14 beziehungsweise C24 bestehen. Aus den entsprechenden Verhältnissen der unterschiedlichen Querschnittsbereiche ergibt sich somit eine Ausbeute der Grundgesamtheit von rund 17% in der Festigkeitsklassenkombination T14-T9 (siehe Kapitel 5.1). Analog dazu liegt die Ausbeute der optimalen Sortierung in der vergleichbaren Biegefestigkeitsklassenkombination C24-C16 bei nur 14% (siehe Tabelle B-1 Anhang B). Besser eignet

sich das tansanische Kiefernholz für die Herstellung von Vollholz- und BSH-Querschnitten niedrigerer Festigkeitsklassen. Zum Beispiel liegen die Ausbeuten der optimalen Sortierung in den Festigkeitsklassen T10 bei 62% beziehungsweise C16 bei 87%. Unter Berücksichtigung der gleichen Verhältnisse bezüglich Festigkeitsklassen im Rand- und Kernbereich wie beim BSH-Querschnitt GL24c, können rund 49% des Zugkollektivs der BSH-Festigkeitsklasse CL22c (T13-T8) zugeordnet werden (siehe Kapitel 5.1). Die Ausbeute der optimalen Sortierung in der vergleichbaren Biegefestigkeitsklassenkombination C22-C14 liegt dagegen bei nur 32% (siehe Kapitel 6.1).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich das in dieser Arbeit untersuchte tansanische Kiefernholz nur für die Verwendung in Holzbauten mit untergeordneten Tragfähigkeitsansprüchen eignet. Wie sich jedoch forstwirtschaftliche Maßnahmen, wie beispielsweise das frühzeitige Schneiden von Ästen, auf die Tragfähigkeit auswirken, sollte in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden. Eine weitere Möglichkeit die Tragfähigkeit von tansanischem Kiefernholz zu verbessern, wäre das Heraustrennen von Fehlstellen mit anschließendem Keilzinken der Lamellen. Da die charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen fast doppelt so hoch ist wie die der unsortierten Vollholzproben, können die Lamellen voraussichtlich dadurch homogenisiert und die mechanischen Eigenschaften des Vollholzes verbessert werden. Ab welcher Fehlstellengröße das Heraustrennen sinnvoll ist, sollte ebenfalls in zukünftigen Forschungen analysiert werden.

Grenzen der Masterarbeit

Die wesentlichen Grenzen dieser Masterarbeit liegen im Stichprobeumfang, der Prüfkörperqualität und in der Prüfkörperherkunft. Da insgesamt nur 100 Prüfkörper je Kollektiv für die Ermittlung der festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften untersucht wurden, konnten die Mindestanforderungen für die Berechnung der charakteristischen Werte nach EN 14358 [56] beziehungsweise zur Herleitung der Maschineneinstellungen nach EN 14081-2 [5] teilweise nicht eingehalten werden. Durch die in Kapitel 3.1 erwähnte Qualität der Prüfkörper war es außerdem nicht immer möglich, die querschnittsschwächste Stelle im Prüfbereich gemäß EN 408 [3] anzuordnen. Außerdem ist es möglich, dass die extremen Verdrehungen der Prüfkörper bereits bei der Einspannung in die Zugprüfmaschine zu Eigenspannungen im Holz geführt haben könnten. Diese wurden jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht näher berücksichtigt. Die Prüfkörperqualität hatte darüber hinaus auch Auswirkungen auf die Anzahl der untersuchten Prüfkörper. So kam es beispielsweise beim Zugkollektiv aufgrund von Verdrehungen zu einem Ausschuss von ca. 10%, dies entspricht 10 Prüfkörpern. Im Vergleich dazu wurden beim Biegekollektiv insgesamt nur drei Prüfkörper aussortiert, da hier enorme Fäulniserscheinungen an den Schnittholzoberflächen festgestellt wurden. Des Weiteren repräsentieren die Ergebnisse dieser Masterarbeit die mechanischen Kennwerte der tansanischen Kiefernholzart *Pinus patula* lediglich aus einer Anbauregion. In Hinblick auf die starken Abhängigkeiten der Holzeigenschaften von *Pinus patula* von den Umweltbedingungen und klimatischen Schwankungen im Land, sollten weitere Forschungen an Prüfkörpern aus verschiedenen Anbauregionen beziehungsweise Plantagen in Tansania durchgeführt werden.

Bezüglich der Annahmen hinsichtlich der Verteilungen aus Kapitel 4 kann gesagt werden, dass eine mögliche Weibull-Verteilung in dieser Arbeit nicht eingehend untersucht wurde. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Vollholzproben werden durch die in EN 14358 [56], sowie in

weiterer Fachliteratur (siehe Kapitel 3.3) empfohlenen Verteilungsfunktionen im Bereich der 5%-Quantile, hinsichtlich des „*Best-Fitting Models*“ der Daten, hinreichend genau beschrieben. Dasselbe gilt auch für die Verteilung der Biegefestigkeit der keilgezinkten Proben (siehe Kapitel 4.2.2). Die in Abbildung 4-7 (b) dargestellte kumulierte Häufigkeitsfunktion überschätzt die tatsächliche Verteilung der Rohdichte der Keilzinkenproben im Bereich des 5%-Quantils jedoch deutlich. Nur marginal bessere Ergebnisse, hinsichtlich des „*Best-Fitting Models*“ der Daten, werden durch eine Log-Normalverteilung erzielt. Da in EN 14358 Abschnitt 3.2.2 [56] jedoch für die Verteilung der Rohdichte eine Normalverteilung vorgeschrieben wird, wurde in der oben genannten Abbildung die kumulierte Häufigkeits- sowie Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung dargestellt.

9 Fazit und Ausblick

Die niedrigen festigkeitsklassenbestimmenden Eigenschaften von tansanischem Kiefernholz – *Pinus Patula* – aus der Literatur wurden in dieser Arbeit bestätigt. Negativ auf die mechanischen Eigenschaften von *Pinus patula* wirkten sich vor allem die zu europäischem Kiefernholz vergleichsweise kurzen Umtriebszeiten, hohe Ästigkeiten und hohe Rohdichteschwankungen aus. Daher sollten sich künftige Arbeiten mit der Fragestellung beschäftigen, wie das Potential von tansanischem Kiefernholz für tragende Zwecke verbessert werden kann. Eine Möglichkeit wird in der Homogenisierung der Schnittholzlamellen durch Keilzinkenverbindungen gesehen, da die Versuche an keilgezinkten Holz fast doppelt so hohe charakteristische Festigkeiten ergaben, als die Versuche an den Vollholzproben. In Delaminierungsversuchen von Ebert [63] wurde aufgezeigt, dass Prüfkörper mit Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff (MUF-Klebstoff) deutlich bessere Ergebnisse als Prüfkörper mit PU-Klebstoff erreichten. Deshalb wird empfohlen, die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen zusätzlich unter Verwendung eines MUF-Klebstoffes zu prüfen. Darüber hinaus sollten auch die Auswirkungen von forstwirtschaftlichen Maßnahmen, wie zum Beispiel dem frühzeitigen Schneiden von Ästen, auf die mechanischen Eigenschaften von tansanischem Kiefernholz untersucht werden.

Durch die vorliegende Arbeit wurde ein Einblick in das Potential der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 [6] sowie in die maschinelle Sortierung von *Pinus patula* aus Tansania ermöglicht. Bei der Zuordnung in die Festigkeitsklassen nach EN 338 [4] wirkte vor allem die charakteristische Festigkeit der unterschiedlichen Sortierklassen limitierend. Im Allgemeinen war die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 [6] für eine Zuordnung in die Festigkeitsklassen nicht zielführend. Daher wurde ein Vorschlag zu optimierten visuellen Sortierregeln erarbeitet. Grundsätzlich war die maschinelle Sortierung effizienter in Bezug auf die Erzielung höherer Festigkeitsklassen und Ausbeuten sowie in der Unterscheidung in mehrere Festigkeitsklassenkombinationen im Vergleich zur visuellen Sortierung. Das Maschinensystem, bei dem der dynamische E-Modul ausgehend von der individuellen Rohdichte ermittelt wurde, ergab eine ähnliche Festigkeitssortierung wie das Maschinensystem, das den dynamischen E-Modul auf Basis der durchschnittlichen Rohdichte berechnete. Der dynamische E-Modul war im Allgemeinen ein geeigneter Sortierparameter für die Festigkeitssortierung von tansanischem Kiefernholz. Hinsichtlich der maschinellen Sortierung von *Pinus patula* sind jedoch weitere Maschinensysteme sowie Kombinationen aus visuellen und maschinellen Sortierparametern denkbar. In zukünftigen Arbeiten sollte außerdem die visuelle Sortierung nach weiteren nationalen Sortiernormen, wie beispielsweise dem BS (*British Standard*), durchgeführt und diskutiert werden. Um eine aussagekräftigere Berechnung der charakteristischen Werte und Herleitung von Maschineneinstellungen zu ermöglichen, wäre es zudem sinnvoll die mechanischen Kennwerte in zukünftigen Arbeiten an einem größeren Stichprobenumfang aus mehreren Anbauregionen Ost-Afrikas zu ermitteln.

Durch diese Masterarbeit wurde das Potential von *Pinus patula* aus Tansania für tragende Zwecke aufgezeigt. Das tansanische Kiefernholz kann neben der bisherigen Verwendung, wie zum Beispiel im Möbelbau, auch als Bauholz in untergeordneten Tragfähigkeitsansprüchen eingesetzt werden. Die damit verbundene Holzverarbeitung und Konstruktion von Holzbauten bietet die Möglichkeit, neue Arbeitsplätze sowie Ausbildungsstätten für die benötigten Fachkräfte zu schaffen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Auswirkung der Festigkeitssortierung [16]	6
Abbildung 2-2:	Schema der direkten und indirekten Sortierung [19].....	7
Abbildung 3-1:	Klimazonen und -klassifikationen von Tansania nach Köppen und Geiger [48]	23
Abbildung 3-2:	Histogramme der dynamischen E-Module des Zug- und Biegekollektivs, n = 100	25
Abbildung 3-3:	Qualität der Prüfkörper zwischen (a) Ende September 2023 und (b) Ende Oktober 2023	26
Abbildung 3-4:	Abmessungen und Belastungen eines Zugprüfkörpers [3] - Maße in [mm]	27
Abbildung 3-5:	Prüfanordnung der Zugprüfung an der TUM FG Holztechnologie	27
Abbildung 3-6:	Last-Verformungs-Kurve innerhalb des Bereichs der elastischen Verformung [3] 28	
Abbildung 3-7:	Abmessungen und Belastungen eines Biegeprüfkörpers [3] - Maße in [mm]	29
Abbildung 3-8:	Prüfanordnung der Biegeprüfung am Lehrstuhl für Baukonstruktion und Holzbau der TUM	30
Abbildung 3-9:	Abmessungen und Belastungen eines Keilzinkenprüfkörpers [3] - Maße in [mm]	32
Abbildung 3-10:	Prüfanordnung der Keilzinkenprüfung am Lehrstuhl für Baukonstruktion und Holzbau der TUM	32
Abbildung 3-11:	Beispiel zur Aufnahme der Bruchbilder von Keilzinkenverbindungen am Prüfkörper 015	33
Abbildung 3-12:	Astmaße zur Berechnung der Ästigkeit eines Einzelastes in Kanthölzern (DEK) [6]	43
Abbildung 3-13:	Astmaße zur Berechnung der Ästigkeit eines Einzelastes in Brettern und Bohlen (DEB) [6]	44
Abbildung 3-14:	Astmaße zur Berechnung der Ästigkeit einer Astansammlung in Brettern und Bohlen (DAB) [6]	44
Abbildung 3-15:	Astmaße zur Berechnung der Ästigkeit von Schmalseitenästen in Brettern und Bohlen (DSB) [6]	44
Abbildung 3-16:	Messstrecken l_i und Jahrringanzahl pro Teilstrecke zur Berechnung der mittleren Jahrringbreite	45
Abbildung 3-17:	Druckholzlänge L zur Berechnung des Druckholzanteils.....	45
Abbildung 3-18:	Prinzipskizze des Versuchsaufbaus für die Eigenfrequenzmessung des dynamischen E-Moduls [24].....	50
Abbildung 3-19:	Flussdiagramm zur Herleitung der Maschineneinstellungen im Rahmen der maschinellen Sortierung.....	52
Abbildung 3-20:	Ausschuss der Proben aus der maschinellen Sortierung; (a) PK 158, (b) PK 167, (c) PK 173	52

Abbildung 4-1:	Wahrscheinlichkeitsdichten und kumulierte Häufigkeiten der statischen Messergebnisse des Zugkollektivs; (a) Zugfestigkeit in N/mm^2 ; (b) Zug-E-Modul in kN/mm^2 ; (c) Rohdichte in kg/m^3 ; $n = 90$	57
Abbildung 4-2:	Bruchbild eines Kurzfaserbruchs mit Ast im Rahmen der Zugprüfung, Vollholzprobe	58
Abbildung 4-3:	Bruchbild eines Kurzfaserbruchs ohne Ast im Rahmen der Zugprüfung, Vollholzprobe	58
Abbildung 4-4:	Wahrscheinlichkeitsdichten und kumulierte Häufigkeiten der statischen Messergebnisse des Biegekollektivs; (a) Biegefestigkeit in N/mm^2 ; (b) lokales Biege-E-Modul in kN/mm^2 ; (c) Rohdichte in kg/m^3 ; $n = 95$	62
Abbildung 4-5:	Bruchbild eines Kurzfaserbruchs mit Ast im Rahmen der Biegeprüfung, Vollholzprobe	63
Abbildung 4-6:	Bruchbild eines Langfaserbruchs mit Ast im Rahmen der Biegeprüfung, Vollholzprobe	63
Abbildung 4-7:	Wahrscheinlichkeitsdichten und kumulierte Häufigkeiten der statischen Messergebnisse des Keilzinkenkollektivs; (a) Biegefestigkeit in N/mm^2 ; (b) Rohdichte in kg/m^3 ; $n = 88$	67
Abbildung 4-8:	Bruchbild eines reinen Scherbruchs, Keilzinkenprobe	68
Abbildung 4-9:	Bruchbild eines reinen Grundbruchs, Keilzinkenprobe	68
Abbildung 5-1:	Ausbeuten der optimalen Sortierung in ausgewählte Zugfestigkeitsklassenkombinationen für (a) höchste Klasse der Kombination (erste Klasse); (b) niedrigste Klasse der Kombination (zweite Klasse); (c) Gesamtausbeute der jeweiligen Klassenkombination, $n = 90$	71
Abbildung 5-2:	Ausbeuten und Zugfestigkeitsklassen der Sortierklassen, die mit den optimierten visuellen Sortierregeln erzielt werden, $n = 90$	74
Abbildung 5-3:	Ausbeuten der maschinellen Sortierung in ausgewählte Zugfestigkeitsklassenkombinationen für (a) höchste Klasse der Kombination (erste Klasse); (b) niedrigste Klasse der Kombination (zweite Klasse); (c) Gesamtausbeute der jeweiligen Klassenkombination, $n = 87$	77
Abbildung 5-4:	Ausbeuten und Zugfestigkeitsklassen der Sortierklassen, die mit den kombinierten Sortierregeln erzielt werden, $n = 87$	79
Abbildung 5-5:	Auswahl an Ausbeuten verschiedener Zugfestigkeitsklassen, die mit den Sortiermethoden (optimale Sortierung, visuelle Sortierung (optimiert), $IP1 = Edyn, 12, i$, $IP2 = Edyn, 12, mean$, $IP3 = \rho 12$, kombinierte Sortierung) erreicht werden. Festigkeitsklassen in der höchsten Klasse der untersuchten Kombinationen; $n = 87$	80
Abbildung 6-1:	Ausbeuten der optimalen Sortierung in ausgewählte Biegefestigkeitsklassenkombinationen für (a) höchste Klasse der Kombination (erste Klasse); (b) niedrigste Klasse der Kombination (zweite Klasse); (c) Gesamtausbeute der jeweiligen Klassenkombination, $n = 95$	84
Abbildung 6-2:	Ausbeuten und Biegefestigkeitsklassen der Sortierklassen, die mit den optimierten visuellen Sortierregeln erzielt werden, $n = 95$	87

Abbildung 6-3:	Ausbeuten der maschinellen Sortierung in ausgewählte Biegefestigkeitsklassenkombinationen für (a) höchste Klasse der Kombination (erste Klasse); (b) niedrigste Klasse der Kombination (zweite Klasse); (c) Gesamtausbeute der jeweiligen Klassenkombination, n = 95.....	90
Abbildung 6-4:	Ausbeuten und Biegefestigkeitsklassen der Sortierklassen, die mit den kombinierten Sortierregeln erzielt werden, n = 95	92
Abbildung 6-5:	Auswahl an Ausbeuten verschiedener Biegefestigkeitsklassen, die mit den Sortiermethoden (optimale Sortierung, visuelle Sortierung (optimiert), $IP1 = Edyn, 12, i$, $IP2 = Edyn, 12, mean$, $IP3 = \rho 12$, kombinierte Sortierung) erreicht werden. Festigkeitsklassen in der höchsten Klasse der untersuchten Kombinationen; n = 95	93
Abbildung 7-1:	Verhältnis zwischen Biege- und Zugfestigkeit für Daten in Gruppen von mind. 20 Prüfkörpern, sortiert nach visuellen und maschinellen Sortierparametern (DEK, $IP1$, $IP2$, $IP3$). Verhältnis basierend auf insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfungen.....	95
Abbildung 7-2:	Verhältnis zwischen Biege- und Zugfestigkeit für Daten in Gruppen von 30 Prüfkörpern, ideal sortiert nach der Festigkeit. Verhältnis basierend auf insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfungen.	96
Abbildung 7-3:	Verhältnis zwischen Zug- und Biegefestigkeit für Daten in Gruppen von mind. 20 Prüfkörpern, sortiert nach visuellen und maschinellen Sortierparametern (DEK, $IP1$, $IP2$, $IP3$). Verhältnis basierend auf insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfungen.....	97
Abbildung 7-4:	Verhältnis zwischen Zug- und Biegefestigkeit für Daten in Gruppen von 30 Prüfkörpern, ideal sortiert nach der Festigkeit. Verhältnis basierend auf insgesamt 90 Zug- und 95 Biegeprüfungen.	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Korrelationsanalyse zwischen Festigkeiten und Sortierparametern für Fichtenholz, eine Zusammenstellung der Bestimmtheitsmaße R^2 aus verschiedenen Studien [19].....	8
Tabelle 2-2:	Zusammenstellung der Forschungsergebnisse zu mechanischen Kennwerten der Waldkiefer (<i>Pinus sylvestris</i>) europäischer Herkunft auf Basis der Zugprüfung in Gebrauchsabmessungen.....	15
Tabelle 2-3:	Zusammenstellung der Forschungsergebnisse zu mechanischen Kennwerten der Waldkiefer (<i>Pinus sylvestris</i>) europäischer Herkunft auf Basis der Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen.....	16
Tabelle 2-4:	Charakteristische Kennwerte von südafrikanischer Kiefer nach SANS 10163-1 [13] für Sortierklassen nach SANS 1783-2 [39] und SANS 1460 [40]	17
Tabelle 2-5:	Forschungsergebnisse nach Burdzik [41] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz aus den Regionen Njombe und Iringa (Tansania) auf Basis der Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, Holzart unbekannt	18
Tabelle 2-6:	Forschungsergebnisse nach Mwamakimbullah et al. [43] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz (<i>Pinus patula</i>) aus der SHI Plantage (Tansania) auf Basis der Zug- und Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, Sortierklassen nach TZS 387 [14] und SANS 1783-2 [39]	19
Tabelle 2-7:	Forschungsergebnisse nach Dowse [44] zu Kennwerten von Kiefernholz (<i>Pinus patula</i>) aus Mpumalanga (Südafrika) auf Basis der zerstörungsfreien Prüfmethoden.....	20
Tabelle 2-8:	Forschungsergebnisse nach Dowse [44] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz (<i>Pinus patula</i>) aus Mpumalanga (Südafrika) auf Basis der Zug- und Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, Sortierklassen nach SANS 1783-2 [39].....	20
Tabelle 2-9:	Forschungsergebnisse nach Van der Merwe et al. [45] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz (<i>Pinus patula</i>) aus Mpumalanga (Südafrika) auf Basis der Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, in Abhängigkeit der Anbauregion und Bodenart.....	21
Tabelle 2-10:	Forschungsergebnisse nach Van der Merwe et al. [45] zu mechanischen Kennwerten von Kiefernholz (<i>Pinus patula</i>) aus Mpumalanga (Südafrika) auf Basis der Biegeprüfung in Gebrauchsabmessungen, in Abhängigkeit der Höhenlage.....	21
Tabelle 3-1:	Charakteristische und erforderliche Kennwerte für die Zugfestigkeitsklassen nach EN 338 [4]	41
Tabelle 3-2:	Charakteristische und erforderliche Kennwerte für die Biegefestigkeitsklassen nach EN 338 [4]	41
Tabelle 3-3:	Sortierregeln für Bretter und Bohlen nach DIN 4074-1 [6], angewendet für die Prüfkörper des Zugkollektivs.....	47
Tabelle 3-4:	Sortierregeln für Kanthölzer nach DIN 4074-1 [6], angewendet für die Prüfkörper des Biegekollektivs	48

Tabelle 3-5:	Grenzwerte für die Sortierparameter DEK, IP_1 , IP_2 und IP_3 für den Vergleich der Festigkeitsprofile, um Gruppen mit gleichwertiger Qualität zu bilden. Mindestanzahl je Gruppe größer 20.....	54
Tabelle 4-1:	Statistische Kennwerte (Mittelwert, Variationskoeffizient (VK), 5%-Quantil) der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie Ästigkeiten des unsortierten Zugkollektivs, n = 90	55
Tabelle 4-2:	Übersicht der Versagensarten der Vollholzproben im Rahmen der Zugprüfung, n = 90	58
Tabelle 4-3:	Korrelationsmatrix der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie Ästigkeiten des Zugkollektivs, Pearson-Korrelationskoeffizient, n = 90.....	59
Tabelle 4-4:	Statistische Kennwerte (Mittelwert, Variationskoeffizient (VK), 5%-Quantil) der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie Ästigkeiten des unsortierten Biegekollektivs, n = 95	60
Tabelle 4-5:	Übersicht der Versagensarten der Vollholzproben im Rahmen der Biegeprüfung, n = 95.....	63
Tabelle 4-6:	Korrelationsmatrix der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie Ästigkeiten des Biegekollektivs, Pearson-Korrelationskoeffizient, n = 95	64
Tabelle 4-7:	Statistische Kennwerte (Mittelwert, Variationskoeffizient (VK), 5%-Quantil) der Biegefestigkeit, der Rohdichte und der Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Prüfung im Rahmen der Keilzinkenprüfung, n = 88.....	66
Tabelle 4-8:	Häufigkeiten der Bruchursachen ($Bruch_a$ - Bruch außerhalb der Keilzinkenverbindung; $Bruch_{Gr}$ - Grundbruch; $Bruch_s$ - Scherbruch) bei keilgezinkten Kiefernproben, n = 88	68
Tabelle 5-1:	Charakteristische Kennwerte, Verhältnisse von charakteristischen Kennwerten zu erforderlichen Grenzwerten und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimalen Sortierung für ausgewählte Zugfestigkeitsklassenkombinationen, n = 90.....	70
Tabelle 5-2:	Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 [6] des Zugkollektivs, gegliedert nach angewandten Sortierregeln für Bretter und Bohlen (Brett- und Lamellen-sortierung), n = 90.....	72
Tabelle 5-3:	Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten visuellen Sortierregeln für ausgewählte Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEB, DAB, JRB), n = 90	73
Tabelle 5-4:	Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP_1 = E_{dyn,12,i}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Zugfestigkeitsklassenkombinationen, n = 87.....	75
Tabelle 5-5:	Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP_2 = E_{dyn,12,mean}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Zugfestigkeitsklassenkombinationen, n = 87	76

Tabelle 5-6:	Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP3 = \rho_{12}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Zugfestigkeitsklassenkombinationen, $n = 87$	76
Tabelle 5-7:	Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für ausgewählte Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter ($IP1, IP2, DEB, DAB$), $n = 87$	78
Tabelle 5-8:	Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der aufgeführten Grenzwertkombinationen für ausgewählte Zugfestigkeitsklassen, $n = 87$	79
Tabelle 6-1:	Charakteristische Kennwerte, Verhältnisse von charakteristischen Kennwerten zu erforderlichen Grenzwerten und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimalen Sortierung für ausgewählte Biegefestigkeitsklassenkombinationen, $n = 95$	83
Tabelle 6-2:	Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 [6] des Biegekollektivs, Sortierregeln für Kanthölzer, $n = 95$	85
Tabelle 6-3:	Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten visuellen Sortierregeln für ausgewählte Biegefestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEK, JRB), $n = 95$	86
Tabelle 6-4:	Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP1 = E_{dyn,12,i}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Biegefestigkeitsklassenkombinationen, $n = 95$	88
Tabelle 6-5:	Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP2 = E_{dyn,12,mean}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Biegefestigkeitsklassenkombinationen, $n = 95$	89
Tabelle 6-6:	Grenzwerte für die Festigkeitssortierung mit $IP3 = \rho_{12}$, charakteristische Kennwerte und Ausbeuten von ausgewählten Biegefestigkeitsklassenkombinationen, $n = 95$	89
Tabelle 6-7:	Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für ausgewählte Biegefestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter ($IP1, IP2, DEK$), $n = 95$	91
Tabelle 6-8:	Charakteristische Kennwerte und Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der aufgeführten Grenzwertkombinationen für ausgewählte Biegefestigkeitsklassen, $n = 95$	92
Tabelle 7-1:	Charakteristische Zugfestigkeitswerte [N/mm^2] in Abhängigkeit von ausgewählten Biegefestigkeitsklassen, die unter Verwendung der Gleichung aus EN 384 [30] ($f_{t,0,k} = -3,07 + 0,73 \cdot f_{m,k}$) und der in der aktuellen Arbeit abgeleiteten Gleichung ($f_{t,0,k} = 0,096 + 0,503 \cdot f_{m,k}$) ermittelt werden.....	96
Tabelle 7-2:	Charakteristische Biegefestigkeitswerte [N/mm^2] in Abhängigkeit von ausgewählten Zugfestigkeitsklassen, die unter Verwendung der Gleichung aus EN 384 [30] ($f_{m,k} = 3,66 + 1,213 \cdot f_{t,0,k}$) und der in der aktuellen Arbeit abgeleiteten Gleichung ($f_{m,k} = 3,215 + 1,405 \cdot f_{t,0,k}$) ermittelt werden.....	98

Literaturverzeichnis

- [1] Technische Universität München - Holz in Forschung und Lehre, „TUM.wood in Tanzania“. Zugegriffen: 26. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.holz.tum.de/holz/aktuell/article/tumwood-weiterbildungsprogramm-1/>
- [2] TUM School of Engineering and Design - Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, „Masterarbeiten am Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion an der TUM“. Zugegriffen: 26. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cee.ed.tum.de/hbb/lehre/abschlussarbeiten/masterarbeiten/>
- [3] „EN 408:2012-10. Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften“. Deutsche Fassung EN 408:2010+A1, 2012.
- [4] „EN 338:2016-07. Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen“. Deutsche Fassung EN 338:2016, 2016.
- [5] „EN 14081-2:2022-08. Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 2: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die Erstprüfung“. Deutsche Fassung EN 14081-2:2018+A1:2022, 2022.
- [6] „DIN 4074-1:2012-06. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz“. 2012.
- [7] United Nations - Department of Economic and Social Affairs, „World Population Prospects 2022“, Population Division. Zugegriffen: 15. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/834>
- [8] Green Ressources, „Public Summary of the Management Plan 2018-2023“, Nr. Version 3, Juni 2023, Zugegriffen: 2. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.green-resources.no/wp-content/uploads/2023/09/GRL_Forest-Management-Plan-2023-Public-Summary.pdf
- [9] H. Neuhaus, *Ingenieurholzbau*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017. doi: 10.1007/978-3-658-14178-3.
- [10] P. Müller und M. Kitenge, „German-Tanzanian Partnership“. Zugegriffen: 20. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://dtpev.de/en/magazine/article/holz-tansania-von-wirtschaft-alltag-und-bearbeitung>
- [11] T. Dr. Isenburg, „Medienbüro Afrika“, Die Wälder Tansanias. Zugegriffen: 15. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://medienbuero-afrika.de/de/die-walder-tansanias/>
- [12] „EN 1995-1-1:2010-12. Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau“. Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008, 2010.
- [13] „SANS 10163-1:2003. The structural use of timber - Part 1: Limit-states design“. 2003.

- [14] „TZS 387:2020. Timber — Strength grading of coniferous sawn timber (cypress and pine) for structural use“. Permanent Secretary Ministry of Industry and Trade (MIT), 23. Januar 2020.
- [15] UNRIC - Regionales Informationszentrum der Vereinten Nationen, „Ziele für nachhaltige Entwicklung“. Zugegriffen: 23. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://unric.org/de/17ziele/>
- [16] G. Ravenshorst, „Species independent strength grading of structural timber“, 2015. doi: 10.4233/uuid:b2243d5d-3275-4d93-9378-b39f97a39f02.
- [17] P. Stapel und A. Rais, „Maschinelle Schnittholzsortierung in Europa“, Nr. LWF aktuell 77/2010, 2010.
- [18] H. J. Blaß und M. Frese, „Sortierverfahren für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung“, *Holz Roh Werkst*, Bd. 62, Nr. 5, S. 325–334, Okt. 2004, doi: 10.1007/s00107-004-0497-7.
- [19] M. Augustin, „Eine zusammenfassende Darstellung der Festigkeitssortierung von Schnittholz“, 2004.
- [20] P. Stapel, „Strength grading of timber with regard to different grading methods“, Technische Universität München, 2014. Zugegriffen: 30. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1185971>
- [21] P. Stapel und J.-W. G. Van De Kuilen, „Efficiency of visual strength grading of timber with respect to origin, species, cross section, and grading rules: a critical evaluation of the common standards“, *Holzforschung*, Bd. 68, Nr. 2, S. 203–216, Feb. 2014, doi: 10.1515/hf-2013-0042.
- [22] „EN 14081-3:2022-06. Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 3: Maschinelle Sortierung, zusätzliche Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle“, Deutsche Fassung EN 14081-3:2022, 2022.
- [23] P. H. Müller, „Mechanical stress-grading of structural timber in Europe, North America and Australia with a research programme on this field for South Africa“, *Wood Science and Technology*, Bd. 2, Nr. 1, S. 43–72, März 1968, doi: 10.1007/BF00366411.
- [24] F. Colling, „Grundlagen der Bemessung“, in *Holzbau: Grundlagen und Bemessung nach EC 5*, F. Colling, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012. doi: 10.1007/978-3-8348-2219-2_3.
- [25] A. Ranta-Maunus, J. K. Denzler, und P. Stapel, „Strength of European Timber. Part 2. Properties of spruce and pine tested in Gradewood project“, *VTT Working Papers*, 2011.
- [26] „EN 14080:2013-09. Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen“. Deutsche Fassung EN 14080:2013, 2013.
- [27] „EN 15497:2014-07. Keilgezinktes Vollholz für tragende Zwecke – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung“. Deutsche Fassung EN 15497:2014, 2014.
- [28] „EN 14081-1:2019-10. Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 1: Allgemeine Anforderungen“. Deutsche Fassung EN 14081-1:2016+A1:2019, 2019.

- [29] „EN 1912:2022-11. Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten“. Deutsche Fassung prEN 1912:2022, 2022.
- [30] „EN 384:2022-08. Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte“. Deutsche Fassung EN 384:2016+A2:2022, 2022.
- [31] P. Schütt und B. Stimm, „Pinus sylvestris“, in *Enzyklopädie der Holzgewächse*, 2006, S. 32 pp.
- [32] Statistisches Bundesamt, „Ländercodes - Statistisches Bundesamt“. Zugegriffen: 9. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Staat/Laendercodes.html>
- [33] S. Hautamäki, H. Kilpeläinen, und E. Verkasalo, „Factors and Models for the Bending Properties of Sawn Timber in Finland and North-Western Russia. Part II. Scots Pine“, *Baltic Forestry*, Bd. 20, S. 142–156, Aug. 2014.
- [34] E. Konofalska, P. Kozakiewicz, W. Buraczyk, H. Szeligowski, und H. Lachowicz, „The Technical Quality of the Wood of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) of Diverse Genetic Origin“, *Forests*, Bd. 12, Nr. 5, Art. Nr. 5, Mai 2021, doi: 10.3390/f12050619.
- [35] I. Burawska, S. Krzosek, P. Mankowski, und M. Grzeškiewicz, „Quality and Bending Properties of Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Sawn Timber“, *Forests*, Bd. 11, S. 1200, Nov. 2020, doi: 10.3390/f11111200.
- [36] D. Ridley-Ellis, D. Gil-Moreno, und A. M. Harte, „Strength grading of timber in the UK and Ireland in 2021“, *International Wood Products Journal*, Bd. 13, Nr. 2, S. 127–136, Apr. 2022, doi: 10.1080/20426445.2022.2050549.
- [37] D. Gil-Moreno, D. Ridley-Ellis, C. O’Ceallaigh, und A. M. Harte, „The relationship between bending and tension strength of Irish and UK spruce and pine“, *European Journal of Wood and Wood Products*, Bd. 80, Nr. 3, S. 585–596, Juni 2022, doi: 10.1007/s00107-022-01787-6.
- [38] E. H. Prieto, J. I. F.-G. Seco, und M. R. D. Barra, „Mechanical characterization of timber according to European standards from Spanish provenances of Scots Pine“, *Forest Systems*, Bd. 12, Nr. 3, Art. Nr. 3, Dez. 2003, doi: 10.5424/1082.
- [39] „SANS 1783-2:2009. Sawn softwood timber Part 2: Stress-graded structural timber and timber for frame wall construction“. 2009.
- [40] „SANS 1460. Laminated timber (glulam)“.
- [41] Prof. Burdzik, „Basic charactersitic Strenght of imported tanzanian Pine“, Nov. 2007.
- [42] „ISO 13910:2014. Timber structures Strength graded timber Test methods for structural properties“. 2014.
- [43] R. Prof. Mwamakimullah, Phillip, und James Sige, „Revision of the standard for pine sawn timber and development of standard for eucalyptus sawn timber“, *Panda Miti Kibiashara - Private Forestry Programme*, März 2018.

- [44] G. P. Dowse, „Selected mechanical properties and the structural grading of young *Pinus patula* sawn timber“, Stellenbosch : University of Stellenbosch, 2010. Zugegriffen: 19. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/10019.1/5341>
- [45] J.-P. van der Merwe *u. a.*, „The impact of site on tree form, wood properties, and lumber quality of plantation-grown *Pinus patula*“, *Holzforschung*, Bd. 78, Nr. 1, S. 1–15, Jan. 2024, doi: 10.1515/hf-2023-0075.
- [46] „SANS 6122. Qualification testing of solid structural timber and laminated structural timber (glulam) for verifying timber grading systems in accordance to a given standard“. 1994.
- [47] J. Erasmus und C. Wessels, „The effect of stand density management on *Pinus patula* lumber properties“, *European Journal of Forest Research*, Bd. 139, S. 1–11, Apr. 2020, doi: 10.1007/s10342-019-01253-8.
- [48] H. Beck, N. Zimmermann, T. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, und E. Wood, „Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution“, *Scientific Data*, Bd. 5, S. 180214, Okt. 2018, doi: 10.1038/sdata.2018.214.
- [49] A. E. Jones, U. U. Wort, A. P. Morse, I. M. Hastings, und A. S. Gagnon, „Climate prediction of El Niño malaria epidemics in north-west Tanzania“, *Malar J*, Bd. 6, Nr. 1, S. 162, Dez. 2007, doi: 10.1186/1475-2875-6-162.
- [50] Green Ressources, „SHI- Holzbroschüre“, Nov. 2020, Zugegriffen: 9. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.greenresources.no/wp-content/uploads/2020/11/SHI-Timber-Brochure-web.pdf>
- [51] K. Fern, „Tropical Plants Database“. Zugegriffen: 9. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Pinus+patula>
- [52] M. Schildbach, „Untersuchung des Wuchsverhaltens von Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) auf Extremstandorten im Nationalpark ‚Sächsische Schweiz‘“, Mai 2010.
- [53] B. I. Nyoka, „Biosecurity in forestry: a case study on the status of invasive forest trees species in Southern Africa.“, Nr. Forest Biosecurity Working Paper FBS/1E, 2003, Zugegriffen: 9. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fao.org/3/ac846e/ac846e00.htm#Contents>
- [54] LOCTITE, „Technisches Datenblatt Loctite HB S109 Purbond“. Zugegriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://derix.de/media/freie-dokumente/Technisches_Datenblatt_Loctite_HB_S109_Purbond.pdf
- [55] „EN 13183-1:2002. Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren“. Deutsche Fassung EN 13183-1, 2002.
- [56] „EN 14358:2016-11. Holzbauwerke – Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte“. Deutsche Fassung EN 14358:2016, 2016.
- [57] H. Unterwieser und G. Schickhofer, „Einfluss von Temperatur und Holzfeuchte auf die dynamischen Eigenschaften von unsortierten Fichtenbrettern“, *European Journal of Wood and Wood Products*, Bd. 70, Sep. 2012, doi: 10.1007/s00107-012-0597-8.

- [58] MiCROTEC, „Viscan“. Zugegriffen: 9. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.microtec.eu/de/produkte/viscan>
- [59] N. Burger und P. Glos, „Verhältnis von Zug- zu Biegefestigkeit bei Vollholz“, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Bd. 55, Nr. 6, S. 345–350, Nov. 1997, doi: 10.1007/s001070050245.
- [60] R. Kliger, M. Perstorper, und G. Johansson, „Bending properties of Norway spruce timber. Comparison between fast- and slow-grown stands and influence of radial position of sawn timber“, <http://dx.doi.org/10.1051/forest:19980306>, Bd. 55, Apr. 1998, doi: 10.1051/forest:19980306.
- [61] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, und T. Meyarivan, „A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II“, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Bd. 6, Nr. 2, S. 182–197, Apr. 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [62] Brookhuis, „Produktinformation zum Timber Grader MTG“. Zugegriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ligna.de/apollo/ligna_2023/obs/Binary/A1235060/1235060_03842213.pdf
- [63] N. Ebert, „Untersuchung der Eigenschaften von tansanischem Kiefernholz“. 6. Januar 2024.

Anhang A

– Zugkollektiv –



Abbildung A-1: Bruchbild eines Kurzfaserbruchs aufgrund von Rindeneinwuchs im Rahmen der Zugprüfung, Vollholzprobe



Abbildung A-2: Bruchbild eines Kurzfaserbruchs aufgrund eines Wipfelbruchs im Rahmen der Zugprüfung, Vollholzprobe

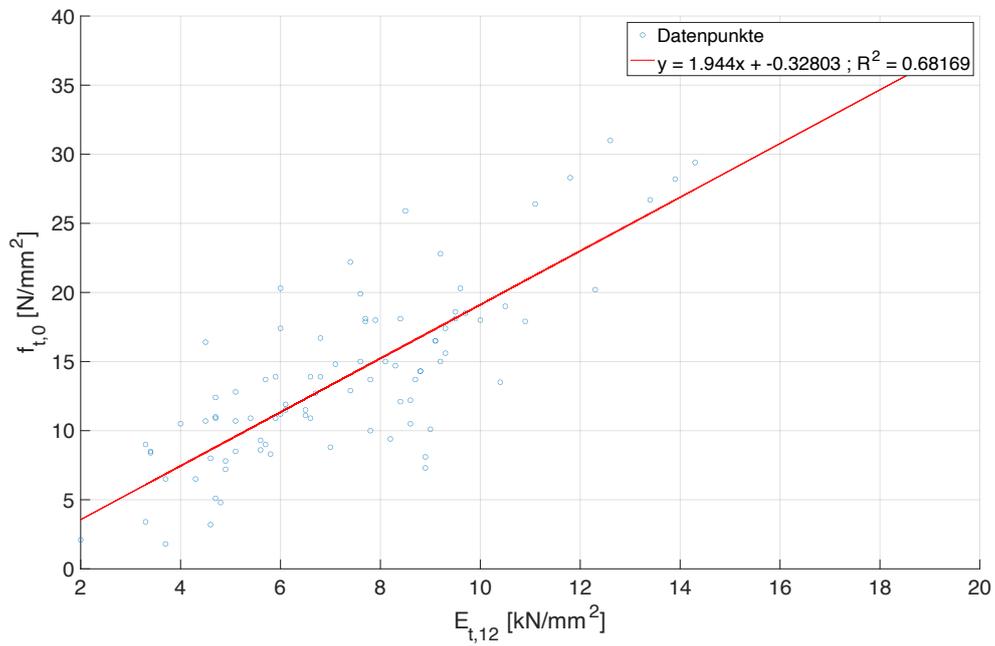


Abbildung A-3: Lineare Regression zwischen $f_{t,0}$ und $E_{t,12}$ (n = 90)

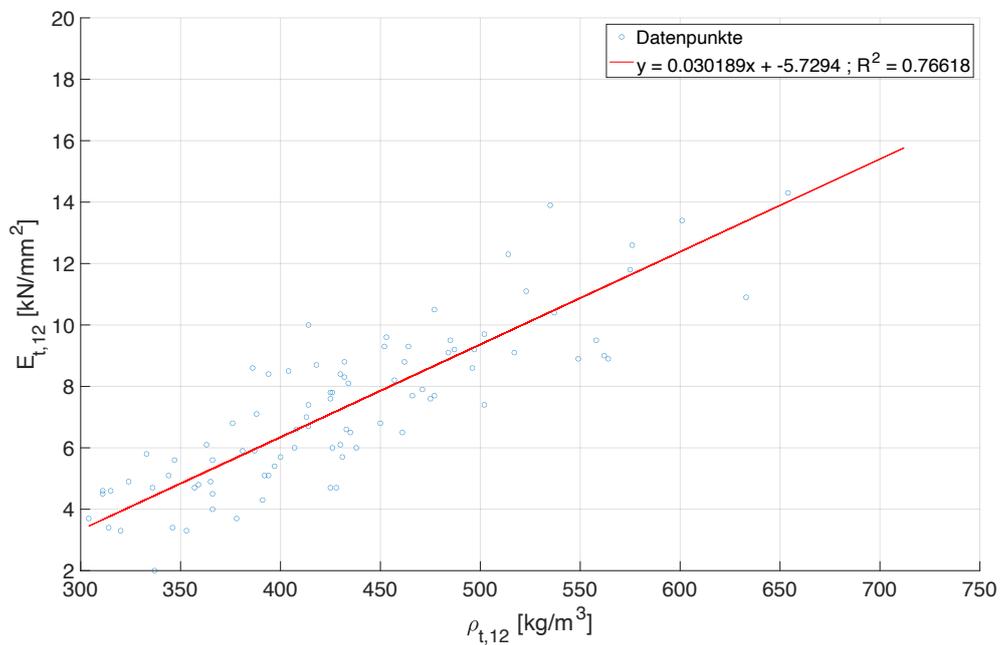


Abbildung A-4: Lineare Regression zwischen $E_{t,12}$ und $\rho_{t,12}$ (n = 90)

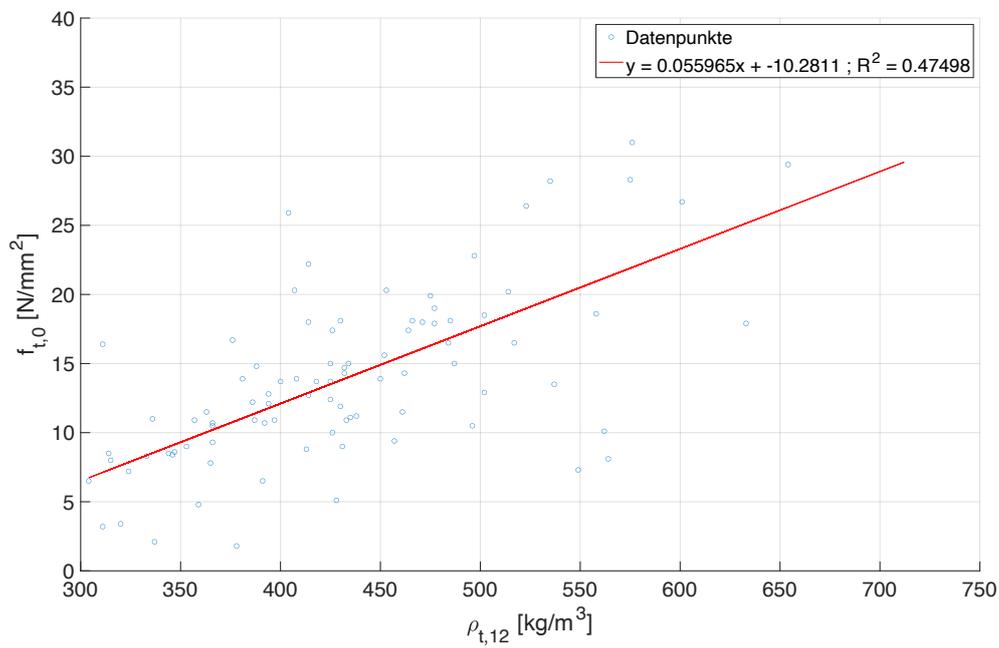


Abbildung A-5: Lineare Regression zwischen $f_{t,0}$ und $\rho_{t,12}$ (n = 90)

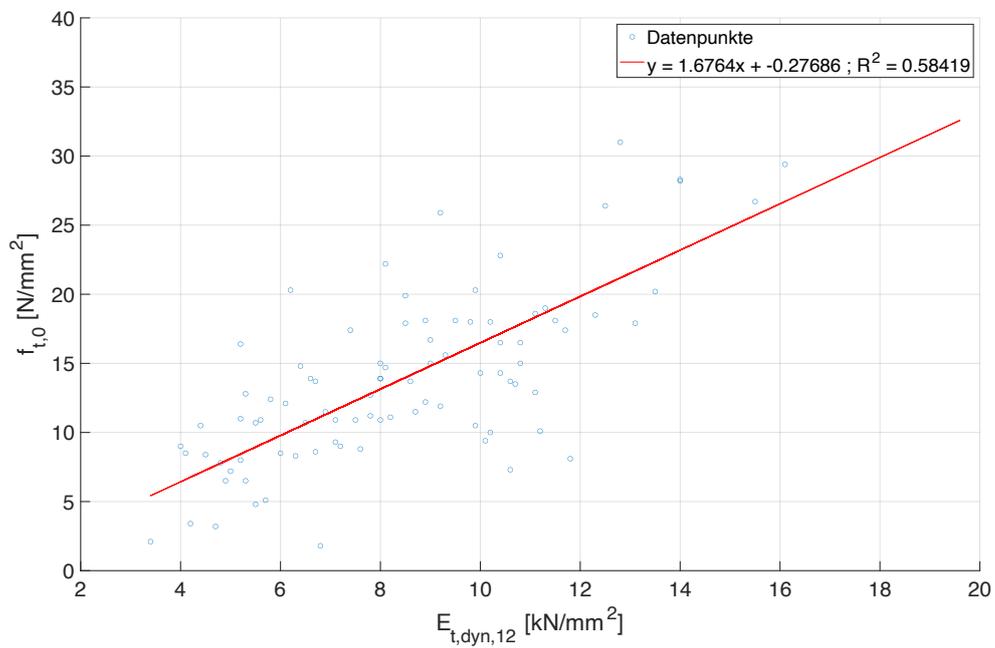


Abbildung A-6: Lineare Regression zwischen $f_{t,0}$ und $E_{t,dyn,12}$ (n = 90)

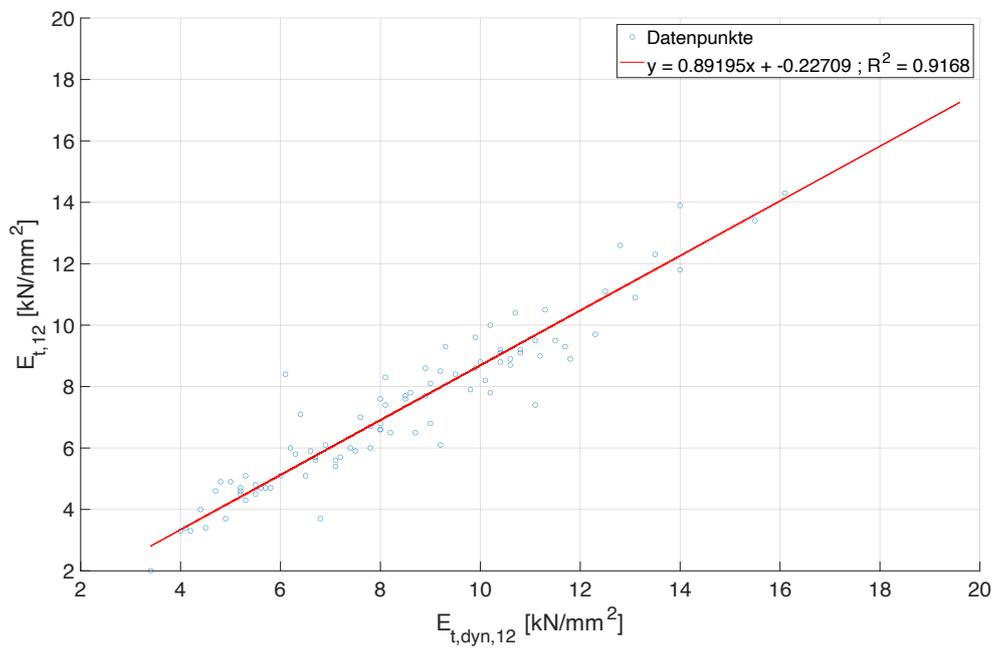


Abbildung A-7: Lineare Regression zwischen $E_{t,12}$ und $E_{t,dyn,12}$ (n = 90)

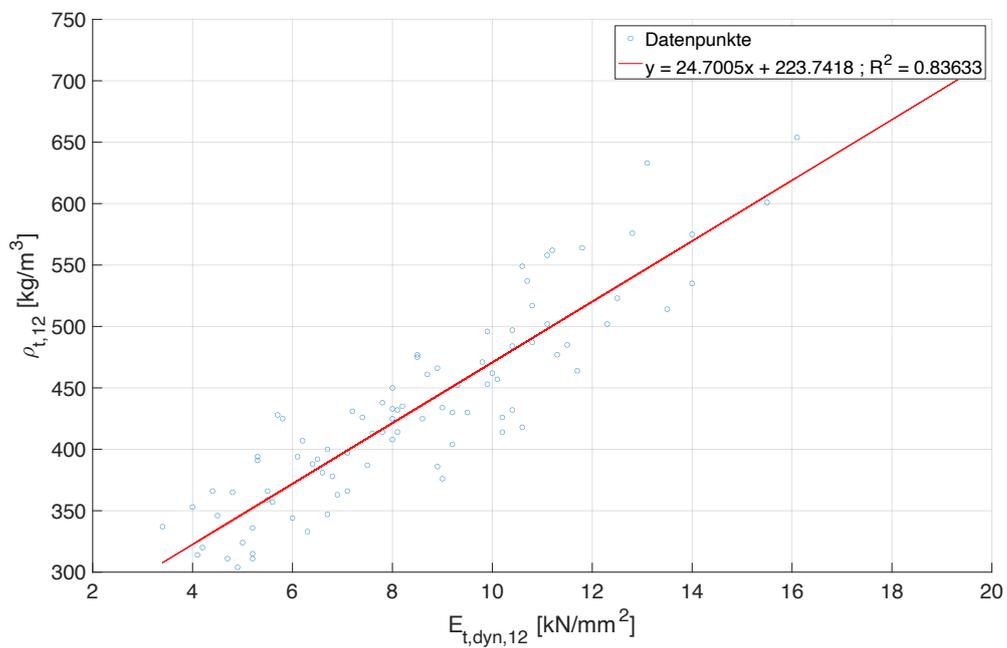


Abbildung A-8: Lineare Regression zwischen $\rho_{t,12}$ und $E_{t,dyn,12}$ (n = 90)

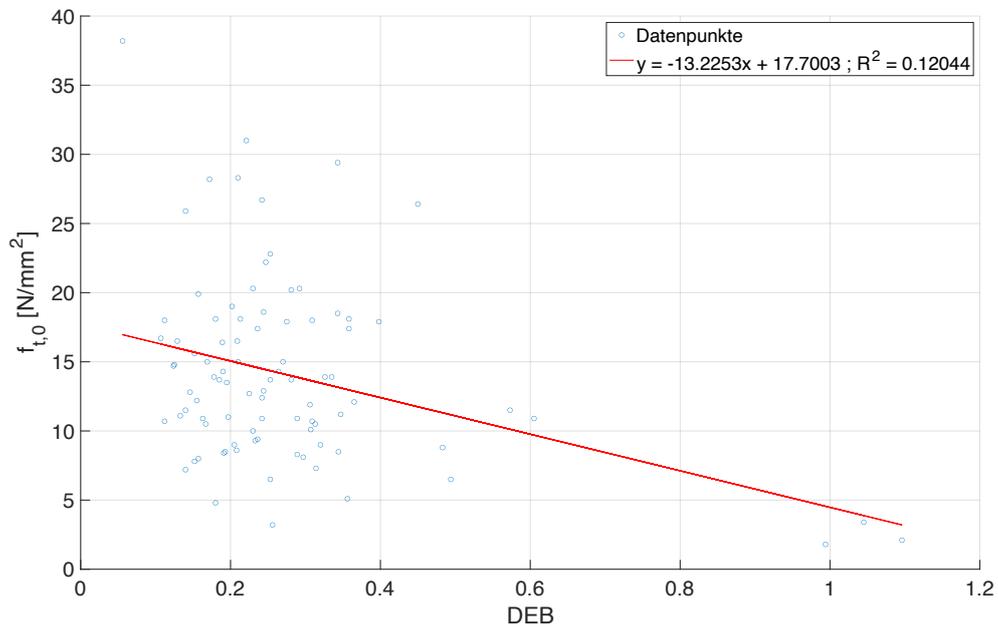


Abbildung A-9: Lineare Regression zwischen $f_{t,0}$ und DEB (n = 90)

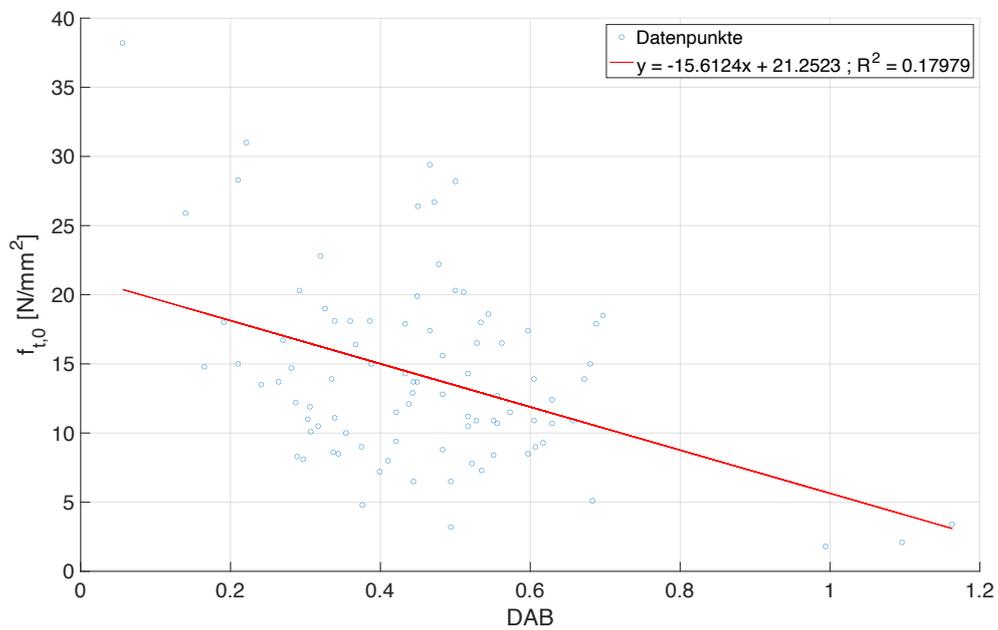


Abbildung A-10: Lineare Regression zwischen $f_{t,0}$ und DAB (n = 90)

Tabelle A-1: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimalen Sortierung für ausgewählte Zugfestigkeitsklassenkombinationen, n = 90

Klasse 1	Ausbeute - Klasse 1			Klasse 2	Ausbeute - Klasse 2			Klassen- kombination	Ausbeute insgesamt
	Festigkeit	E-Modul	Rohdichte		Festigkeit	E-Modul	Rohdichte		
T8	0,82	0,72	0,48	-				T8	0,82
T9	0,72	0,27	0,07	-				T9	0,72
T10	0,62	0,26	0,07	-				T10	0,62
T11	0,53	0,26	0,07	-				T11	0,53
T12	0,43	0,24	0,07	-				T12	0,43
T13	0,32	0,18	0,07	T13-T8	0,46	0,42	0,00	T13	0,78
T15/T14,5/T14	0,10	0,11	0,07	T15/T14,5/T14-T9	0,66	0,14	0,00	T15/T14,5/T14-T9	0,77
T15/T14,5/T14	0,10	0,11	0,07	T15/T14,5/T14-T8	0,74	0,67	0,37	T15/T14,5/T14-T8	0,85
T16	0,10	0,10	0,00	T16-T9	0,69	0,41	0,00	T16-T9	0,79
T16	0,10	0,10	0,00	T16-T8	0,77	0,68	0,58	T16-T8	0,87
T16	0,10	0,10	0,00	T16-T9	0,67	0,17	0,00	T16-T9	0,77
T16	0,10	0,10	0,00	T16-T8	0,76	0,68	0,38	T16-T8	0,86
T18	0,08	0,09	0,00	T18-T9	0,69	0,42	0,00	T18-T9	0,78
T18	0,08	0,09	0,00	T18-T8	0,77	0,69	0,39	T18-T8	0,86
T22/T21	0,08	0,06	0,00	T22/T21-T14	0,70	0,43	0,00	T22/T21-T14	0,78
T22/T21	0,08	0,06	0,00	T22/T21-T8	0,79	0,70	0,40	T22/T21-T8	0,87
T24	0,00	0,00	0,00	-				T24	0,00
T24	0,00	0,00	0,00	-				T24	0,00

Tabelle A-2: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEB, DAB, JRB), n = 90

Jahringbreite [mm]	DEB 1,2															
	DAB 1,2		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse														
28	1,00	-	0,98	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
26	1,00	-	0,98	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
24	0,98	-	0,97	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
22	0,97	-	0,96	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
20	0,93	-	0,93	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
18	0,88	-	0,88	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,77	-	0,57	-	0,32	-
16	0,77	-	0,77	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,68	-	0,50	-	0,29	-
14	0,66	-	0,66	-	0,64	T8	0,64	T8	0,64	T8	0,59	T8	0,43	T8	0,26	-
12	0,60	-	0,60	-	0,59	T8	0,59	T8	0,59	T8	0,54	T8	0,40	T8	0,24	-
10	0,49	T8	0,47	T8	0,36	T8	0,20	T8								
8	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-								
6	0,31	T8	0,29	-	0,22	T8	0,12	-								
4	0,13	T10	0,10	T10	0,07	-										

Jahringbreite [mm]	DEB 1,1															
	DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse														
28	1,00	-	0,98	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
26	1,00	-	0,98	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
24	0,98	-	0,97	-	0,93	-	0,96	-	0,96	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
22	0,97	-	0,96	-	0,96	-	0,94	-	0,94	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
20	0,93	-	0,93	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
18	0,88	-	0,88	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,77	-	0,57	-	0,32	-
16	0,77	-	0,77	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,68	-	0,50	-	0,29	-
14	0,66	-	0,66	-	0,64	T8	0,64	T8	0,64	T8	0,59	T8	0,43	T8	0,26	-
12	0,60	-	0,60	-	0,59	T8	0,59	T8	0,59	T8	0,54	T8	0,40	T8	0,24	-
10	0,49	T8	0,47	T8	0,36	T8	0,20	T8								
8	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-								
6	0,31	T8	0,29	-	0,22	T8	0,12	-								
4	0,13	T10	0,10	T10	0,07	-										

Fortsetzung **Tabelle A-2**: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEB, DAB, JRB), n = 90

Jahringbreite [mm]	DEB 1,0																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,98	-	0,98	-	0,98	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
26	0,98	-	0,98	-	0,98	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
24	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
22	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
20	0,93	-	0,93	-	0,93	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
18	0,88	-	0,88	-	0,88	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,77	-	0,57	-	0,32	-
16	0,77	-	0,77	-	0,77	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,68	-	0,50	-	0,29	-
14	0,66	-	0,66	-	0,66	-	0,64	T8	0,64	T8	0,64	T8	0,59	T8	0,43	T8	0,26	-
12	0,60	-	0,60	-	0,60	-	0,59	T8	0,59	T8	0,59	T8	0,54	T8	0,40	T8	0,24	-
10	0,49	T8	0,47	T8	0,36	T8	0,20	T8										
8	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-										
6	0,31	T8	0,29	-	0,22	T8	0,12	-										
4	0,13	T10	0,10	T10	0,07	-												

Jahringbreite [mm]	DEB 0,9																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
26	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
24	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
22	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
20	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
18	0,87	-	0,87	-	0,89	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,77	-	0,57	-	0,32	-
16	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,68	-	0,50	-	0,29	-
14	0,64	T8	0,59	T8	0,43	T8	0,26	-										
12	0,59	T8	0,54	T8	0,40	T8	0,24	-										
10	0,49	T8	0,47	T8	0,36	T8	0,20	T8										
8	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-										
6	0,31	T8	0,29	-	0,22	T8	0,12	-										
4	0,13	T10	0,10	T10	0,07	-												

Fortsetzung **Tabelle A-2**: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEB, DAB, JRB), n = 90

Jahringbreite [mm]	DEB 0,8																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
26	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
24	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
22	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
20	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
18	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,77	-	0,57	-	0,32	-
16	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,68	-	0,50	-	0,29	-
14	0,64	T8	0,59	T8	0,43	T8	0,26	-										
12	0,59	T8	0,54	T8	0,40	T8	0,24	-										
10	0,49	T8	0,47	T8	0,36	T8	0,20	T8										
8	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-										
6	0,31	T8	0,29	-	0,22	T8	0,12	-										
4	0,13	T10	0,10	T10	0,07	-												

Jahringbreite [mm]	DEB 0,7																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
26	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,97	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
24	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
22	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
20	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
18	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,77	-	0,57	-	0,32	-
16	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,76	-	0,68	-	0,50	-	0,29	-
14	0,64	T8	0,59	T8	0,43	T8	0,26	-										
12	0,59	T8	0,54	T8	0,40	T8	0,24	-										
10	0,49	T8	0,47	T8	0,36	T8	0,20	T8										
8	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-										
6	0,31	T8	0,29	-	0,22	T8	0,12	-										
4	0,13	T10	0,10	T10	0,07	-												

Fortsetzung **Tabelle A-2**: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEB, DAB, JRB), n = 90

Jahringbreite [mm]	DEB 0,6																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
26	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,96	-	0,83	-	0,63	-	0,38	-
24	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,82	-	0,63	-	0,38	-
22	0,93	-	0,93	-	0,93	-	0,93	-	0,93	-	0,93	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
20	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,82	-	0,62	-	0,38	-
18	0,86	-	0,86	-	0,86	-	0,86	-	0,86	-	0,86	-	0,77	-	0,57	-	0,32	-
16	0,74	-	0,74	-	0,74	-	0,74	-	0,74	-	0,74	-	0,68	-	0,50	-	0,29	-
14	0,64	T8	0,59	T8	0,43	T8	0,26	-										
12	0,59	T8	0,54	T8	0,40	T8	0,24	-										
10	0,49	T8	0,49	T8	0,49	T8	0,45	T8	0,49	T8	0,49	T8	0,47	T8	0,36	T8	0,20	T8
8	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-										
6	0,31	T8	0,29	-	0,22	T8	0,12	-										
4	0,13	T10	0,10	T10	0,07	-												

Jahringbreite [mm]	DEB 0,5																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,82	-	0,63	-	0,38	-
26	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,94	-	0,82	-	0,63	-	0,38	-
24	0,93	-	0,93	-	0,93	-	0,93	-	0,93	-	0,93	-	0,82	-	0,63	-	0,38	-
22	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,92	-	0,81	-	0,62	-	0,38	-
20	0,90	-	0,90	-	0,90	-	0,90	-	0,90	-	0,90	-	0,81	-	0,62	-	0,38	-
18	0,84	-	0,84	-	0,84	-	0,84	-	0,84	-	0,84	-	0,76	-	0,57	-	0,32	-
16	0,73	-	0,73	-	0,73	-	0,73	-	0,73	-	0,73	-	0,67	-	0,50	-	0,29	-
14	0,63	T8	0,58	T8	0,43	T8	0,26	-										
12	0,58	T8	0,53	T8	0,40	T8	0,24	-										
10	0,48	T8	0,46	T8	0,36	T8	0,20	T8										
8	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-										
6	0,31	T8	0,29	-	0,22	T8	0,12	-										
4	0,13	T10	0,10	T10	0,07	-												

Fortsetzung **Tabelle A-2**: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEB, DAB, JRB), n = 90

Jahringbreite [mm]	DEB 0,4																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,79	-	0,60	-	0,38	-
26	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,91	-	0,79	-	0,60	-	0,38	-
24	0,90	-	0,90	-	0,90	-	0,90	-	0,90	-	0,90	-	0,79	-	0,60	-	0,38	-
22	0,89	-	0,89	-	0,89	-	0,89	-	0,89	-	0,89	-	0,78	-	0,59	-	0,38	-
20	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,87	-	0,78	-	0,59	-	0,38	-
18	0,81	-	0,81	-	0,81	-	0,81	-	0,81	-	0,81	-	0,72	-	0,53	-	0,32	-
16	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,64	-	0,48	-	0,29	-
14	0,62	T8	0,57	T8	0,42	T8	0,26	-										
12	0,57	T8	0,52	T8	0,39	T8	0,24	-										
10	0,47	T8	0,44	T8	0,34	T8	0,20	T8										
8	0,40	T8	0,38	T8	0,29	T8	0,17	-										
6	0,30	-	0,30	-	0,30	-	0,30	-	0,30	-	0,30	-	0,28	-	0,21	-	0,12	-
4	0,12	T10	0,09	T9	0,07	-												

Jahringbreite [mm]	DEB 0,3																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,64	-	0,52	-	0,32	-
26	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,71	-	0,64	-	0,52	-	0,32	-
24	0,70	-	0,70	-	0,70	-	0,70	-	0,70	-	0,70	-	0,64	-	0,52	-	0,32	-
22	0,69	-	0,69	-	0,69	-	0,69	-	0,69	-	0,69	-	0,63	-	0,51	-	0,32	-
20	0,68	-	0,68	-	0,68	-	0,68	-	0,68	-	0,68	-	0,63	-	0,51	-	0,32	-
18	0,63	-	0,63	-	0,63	-	0,63	-	0,63	-	0,63	-	0,59	-	0,47	-	0,28	-
16	0,54	-	0,54	-	0,54	-	0,54	-	0,54	-	0,54	-	0,51	-	0,41	-	0,24	-
14	0,49	T8	0,46	T8	0,38	T8	0,22	T8										
12	0,44	T8	0,42	T8	0,34	T8	0,21	-										
10	0,36	T9	0,30	T9	0,17	T8												
8	0,31	T9	0,26	T8	0,14	T8												
6	0,22	T8	0,18	-	0,10	-												
4	0,09	T12	0,06	T12	0,04	-												

Fortsetzung **Tabelle A-2**: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEB, DAB, JRB), n = 90

Jahringbreite [mm]	DEB 0,2																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,34	-	0,34	-	0,34	-	0,34	-	0,34	-	0,34	-	0,32	-	0,26	-	0,19	-
26	0,34	-	0,34	-	0,34	-	0,34	-	0,34	-	0,34	-	0,32	-	0,26	-	0,19	-
24	0,33	-	0,33	-	0,33	-	0,33	-	0,33	-	0,33	-	0,32	-	0,26	-	0,19	-
22	0,32	-	0,32	-	0,32	-	0,32	-	0,32	-	0,32	-	0,31	-	0,24	-	0,19	-
20	0,32	-	0,32	-	0,32	-	0,32	-	0,32	-	0,32	-	0,31	-	0,24	-	0,19	-
18	0,29	-	0,29	-	0,29	-	0,29	-	0,29	-	0,29	-	0,28	-	0,21	-	0,16	-
16	0,24	-	0,24	-	0,24	-	0,24	-	0,24	-	0,24	-	0,23	-	0,19	-	0,13	-
14	0,22	T8	0,21	T8	0,19	-	0,13	-										
12	0,20	T9	0,19	T8	0,17	-	0,12	-										
10	0,14	T8	0,13	-	0,09	-												
8	0,12	-	0,12	-	0,12	-	0,12	-	0,12	-	0,12	-	0,12	-	0,11	-	0,08	-
6	0,07	-	0,07	-	0,07	-	0,07	-	0,07	-	0,07	-	0,07	-	0,06	-	0,04	-
4	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

Jahringbreite [mm]	DEB 0,1																	
	DAB 1,2		DAB 1,1		DAB 1,0		DAB 0,9		DAB 0,8		DAB 0,7		DAB 0,6		DAB 0,5		DAB 0,4	
	Ausbeute	T-Klasse																
28	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
26	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
24	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
22	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
20	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
18	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
16	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
14	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
12	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
10	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
8	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
6	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
4	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

Tabelle A-3: Ausbeuten von ausgewählten Zugfestigkeitsklassenkombinationen für die Festigkeitssortierung nach IP_1 , IP_2 und IP_3 , $n = 87$

Klasse 1	Ausbeute - Klasse 1			Klasse 2	Ausbeute - Klasse 2			Klassenkombination	Ausbeute - insgesamt		
	IP1	IP2	IP3		IP1	IP2	IP3		IP1	IP2	IP3
T8	0,70	0,55	0,47	-				T8	0,70	0,55	0,47
T9	0,23	0,30	0,00	-				T9	0,23	0,30	0,00
T10	0,16	0,22	0,00	-				T10	0,16	0,22	0,00
T11	0,11	0,20	0,00	-				T11	0,11	0,20	0,00
T12	0,11	0,20	0,00	-				T12/T11	0,11	0,20	0,00
T13	0,11	0,10	0,00	T13-T8	0,69	0,55	0,00	T13-T8	0,80	0,65	0,00
T14	0,11	0,10	0,00	T14-T9	0,00	0,11	0,00	T14-T9	0,11	0,21	0,00
T14	0,11	0,10	0,00	T14-T8	0,69	0,55	0,00	T14-T8	0,80	0,65	0,00
T14,5	0,11	0,10	0,00	T14,5-T9	0,00	0,11	0,00	T14,5-T9	0,11	0,21	0,00
T14,5	0,11	0,10	0,00	T14,5-T8	0,69	0,55	0,00	T14,5-T8	0,80	0,65	0,00
T15	0,11	0,09	0,00	T15-T9	0,00	0,13	0,00	T15-T9	0,11	0,22	0,00
T15	0,11	0,09	0,00	T15-T8	0,69	0,61	0,00	T15-T8	0,80	0,70	0,00
T16	0,10	0,09	0,00	T16-T9	0,00	0,13	0,00	T16-T9	0,10	0,22	0,00
T16	0,10	0,09	0,00	T16-T8	0,70	0,61	0,00	T16-T8	0,80	0,70	0,00
T18	0,06	0,06	0,00	T18-T9	0,06	0,24	0,00	T18-T9	0,12	0,30	0,00
T18	0,06	0,06	0,00	T18-T8	0,72	0,64	0,00	T18-T8	0,78	0,70	0,00
T21	0,06	0,00	0,00	T21-T14	0,00	0,00	0,00	T21-T14	0,06	0,00	0,00
T21	0,06	0,00	0,00	T21-T8	0,72	0,00	0,00	T21-T8	0,78	0,00	0,00
T22	0,00	0,00	0,00	T22-T14	0,00	0,00	0,00	T22-T14	0,00	0,00	0,00
T22	0,00	0,00	0,00	T22-T8	0,00	0,00	0,00	T22-T8	0,00	0,00	0,00

Tabelle A-4: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter (IP_1 , IP_2 , DEB, DAB), $n = 87$

IP1 [kN/mm ²]	DEB 0,7									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
3	1,00	-	0,86	-	0,66	-	0,39	-	0,17	-
4	0,99	-	0,86	-	0,66	-	0,39	-	0,17	-
5	0,92	-	0,79	-	0,61	-	0,37	-	0,17	-
6	0,78	-	0,69	-	0,53	-	0,32	-	0,17	-
7	0,68	T8	0,60	T8	0,45	T8	0,28	-	0,14	-
8	0,56	-	0,53	T8	0,43	T8	0,26	-	0,14	-
9	0,41	-	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-	0,09	-
10	0,33	-	0,31	-	0,24	-	0,14	-	0,08	-
11	0,20	T9	0,17	T8	0,15	T8	0,08	-	0,05	-
12	0,11	T15	0,09	T18	0,08	T22	0,03	T16	0,03	T16
13	0,08	T14,5	0,07	T16	0,06	T21	0,02	-	0,02	-
14	0,06	T21	0,06	T21	0,06	T21	0,02	-	0,02	-
15	0,03	T16	0,03	T16	0,03	T16	0,01	-	0,01	-
16	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-

IP1 [kN/mm ²]	DEB 0,6									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
3	0,99	-	0,86	-	0,66	-	0,39	-	0,17	-
4	0,98	-	0,86	-	0,66	-	0,39	-	0,17	-
5	0,91	-	0,79	-	0,61	-	0,37	-	0,17	-
6	0,77	-	0,69	-	0,53	-	0,32	-	0,17	-
7	0,67	T8	0,60	T8	0,45	T8	0,28	-	0,14	-
8	0,56	T8	0,53	T8	0,43	T8	0,26	-	0,14	-
9	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-	0,09	-
10	0,33	-	0,31	-	0,24	-	0,14	-	0,08	-
11	0,20	T9	0,17	T8	0,15	T8	0,08	-	0,05	-
12	0,11	T15	0,09	T18	0,08	T22	0,03	T16	0,03	T16
13	0,08	T14,5	0,07	T16	0,06	T21	0,02	-	0,02	-
14	0,06	T21	0,06	T21	0,06	T21	0,02	-	0,02	-
15	0,03	T16	0,03	T16	0,03	T16	0,01	-	0,01	-
16	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-

IP1 [kN/mm ²]	DEB 0,5									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
3	0,98	-	0,85	-	0,66	-	0,39	-	0,17	-
4	0,97	-	0,85	-	0,66	-	0,39	-	0,17	-
5	0,90	-	0,78	-	0,61	-	0,37	-	0,17	-
6	0,76	-	0,68	-	0,53	-	0,32	-	0,17	-
7	0,66	T8	0,59	T8	0,45	T8	0,28	-	0,14	-
8	0,55	T8	0,52	T8	0,43	T8	0,26	-	0,14	-
9	0,41	T8	0,39	T8	0,30	T8	0,17	-	0,09	-
10	0,33	-	0,31	-	0,24	-	0,14	-	0,08	-
11	0,20	T9	0,17	T8	0,15	T8	0,08	-	0,05	-
12	0,11	T15	0,09	T18	0,08	T22	0,03	T16	0,03	T16
13	0,08	T14,5	0,07	T16	0,06	T21	0,02	-	0,02	-
14	0,06	T21	0,06	T21	0,06	T21	0,02	-	0,02	-
15	0,03	T16	0,03	T16	0,03	T16	0,01	-	0,01	-
16	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-

Fortsetzung **Tabelle A-4**: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter (IP_1 , IP_2 , DEB, DAB)

IP1 [kN/mm ²]	DEB 0,4									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
3	0,94	-	0,82	-	0,62	-	0,39	-	0,17	-
4	0,93	-	0,82	-	0,62	-	0,39	-	0,17	-
5	0,86	-	0,75	-	0,57	-	0,37	-	0,17	-
6	0,74	-	0,66	-	0,51	-	0,32	-	0,17	-
7	0,63	T8	0,56	T8	0,43	T8	0,28	-	0,14	-
8	0,54	T8	0,51	T8	0,41	T8	0,26	-	0,14	-
9	0,40	T8	0,40	-	0,29	T8	0,17	-	0,09	-
10	0,32	-	0,30	-	0,23	-	0,14	-	0,08	-
11	0,18	T8	0,16	T8	0,14	-	0,08	-	0,05	-
12	0,10	T14,5	0,08	T18	0,07	T22	0,03	T16	0,03	T16
13	0,08	T14,5	0,07	T16	0,06	T21	0,02	-	0,02	-
14	0,06	T21	0,06	T21	0,06	T21	0,02	-	0,02	-
15	0,03	T16	0,03	T16	0,03	T16	0,01	-	0,01	-
16	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-

IP1 [kN/mm ²]	DEB 0,3									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
3	0,74	-	0,67	-	0,54	-	0,33	-	0,17	-
4	0,74	-	0,67	-	0,54	-	0,33	-	0,17	-
5	0,68	-	0,61	-	0,51	-	0,32	-	0,17	-
6	0,56	T8	0,52	T8	0,44	-	0,28	-	0,17	-
7	0,49	T8	0,45	T8	0,37	T8	0,23	-	0,14	-
8	0,43	T9	0,41	T9	0,36	T8	0,22	-	0,14	-
9	0,31	T8	0,31	T8	0,25	T8	0,15	-	0,09	-
10	0,26	T8	0,26	T8	0,21	-	0,13	-	0,08	-
11	0,14	T8	0,14	T8	0,11	-	0,07	-	0,05	-
12	0,07	T16	0,07	T16	0,06	T21	0,03	T16	0,03	T16
13	0,06	T15	0,06	T15	0,05	T18	0,02	-	0,02	-
14	0,05	T18	0,05	T18	0,05	T18	0,02	-	0,02	-
15	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-
16	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

IP1 [kN/mm ²]	DEB 0,2									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
3	0,36	-	0,33	-	0,26	-	0,20	-	0,10	-
4	0,36	-	0,33	-	0,26	-	0,20	-	0,10	-
5	0,32	-	0,30	-	0,25	-	0,18	-	0,10	-
6	0,22	T9	0,21	T8	0,18	-	0,14	-	0,10	-
7	0,20	T9	0,18	T9	0,16	-	0,13	-	0,09	-
8	0,20	T9	0,18	T9	0,16	-	0,13	-	0,09	-
9	0,10	T8	0,10	T8	0,08	-	0,06	-	0,05	-
10	0,07	-	0,07	-	0,05	-	0,03	-	0,03	-
11	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-
12	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-
13	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-
14	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-
15	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
16	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

Fortsetzung **Tabelle A-4**: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter (IP_1 , IP_2 , DEB, DAB)

IP1 [kN/mm ²]	DEB 0,1									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
3	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
4	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
5	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
6	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
7	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
8	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
9	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
10	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
11	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
12	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
13	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
14	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
15	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
16	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

IP3 [kg/m ³]	DEB 0,7									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
300	1,00	-	0,86	-	0,66	-	0,39	-	0,17	-
350	0,95	-	0,82	-	0,61	-	0,38	-	0,17	-
400	0,80	-	0,69	-	0,52	-	0,31	-	0,15	-
450	0,57	-	0,51	-	0,38	T8	0,21	-	0,09	-
500	0,29	-	0,26	-	0,17	-	0,09	-	0,06	-
550	0,15	-	0,14	-	0,09	-	0,06	-	0,06	-
600	0,03	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
650	0,02	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

IP3 [kg/m ³]	DEB 0,6									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
300	0,99	-	0,86	-	0,66	-	0,39	-	0,17	-
350	0,94	-	0,82	-	0,61	-	0,38	-	0,17	-
400	0,79	-	0,69	-	0,52	-	0,31	-	0,15	-
450	0,57	-	0,51	-	0,38	T8	0,21	-	0,09	-
500	0,29	-	0,26	-	0,17	-	0,09	-	0,06	-
550	0,15	-	0,14	-	0,09	-	0,06	-	0,06	-
600	0,03	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
650	0,02	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

Fortsetzung **Tabelle A-4**: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter (IP_1 , IP_2 , DEB, DAB)

IP3 [kg/m ³]	DEB 0,5									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
300	0,98	-	0,85	-	0,66	-	0,39	-	0,17	-
350	0,93	-	0,80	-	0,61	-	0,38	-	0,17	-
400	0,78	-	0,68	-	0,52	-	0,31	-	0,15	-
450	0,56	-	0,49	-	0,38	T8	0,21	-	0,09	-
500	0,29	-	0,26	-	0,17	-	0,09	-	0,06	-
550	0,15	-	0,14	-	0,09	-	0,06	-	0,06	-
600	0,03	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
650	0,02	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

IP3 [kg/m ³]	DEB 0,4									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
300	0,94	-	0,82	-	0,62	-	0,39	-	0,17	-
350	0,90	-	0,77	-	0,57	-	0,38	-	0,17	-
400	0,75	-	0,64	-	0,48	T8	0,31	-	0,15	-
450	0,54	-	0,47	T8	0,36	T8	0,21	-	0,09	-
500	0,28	-	0,25	-	0,16	-	0,09	-	0,06	-
550	0,15	-	0,14	-	0,09	-	0,06	-	0,06	-
600	0,03	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
650	0,02	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

IP3 [kg/m ³]	DEB 0,3									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
300	0,74	-	0,67	-	0,54	-	0,33	-	0,17	-
350	0,69	-	0,62	-	0,49	-	0,32	-	0,17	-
400	0,57	T8	0,52	T8	0,43	T8	0,26	-	0,15	-
450	0,41	T8	0,38	T8	0,31	T8	0,17	-	0,09	-
500	0,17	T8	0,17	T8	0,13	-	0,07	-	0,06	-
550	0,10	-	0,10	-	0,08	-	0,06	-	0,06	-
600	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
650	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

IP3 [kg/m ³]	DEB 0,2									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
300	0,36	-	0,33	-	0,26	-	0,20	-	0,10	-
350	0,33	-	0,31	-	0,24	-	0,18	-	0,10	-
400	0,25	-	0,23	-	0,20	-	0,15	-	0,09	-
450	0,15	T8	0,14	T8	0,11	T8	0,08	-	0,05	-
500	0,06	-	0,06	-	0,03	-	0,02	-	0,02	-
550	0,03	-	0,03	-	0,03	-	0,02	-	0,02	-
600	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
650	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

Fortsetzung **Tabelle A-4**: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für Zugfestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter (IP_1 , IP_2 , DEB, DAB)

IP3 [kg/m ³]	DEB 0,1									
	DAB		DAB		DAB		DAB		DAB	
	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse	Ausbeute	T-Klasse
300	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
350	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
400	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
450	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
500	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
550	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
600	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
650	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-

Anhang B

– Biegekollektiv –



Abbildung B-1: Bruchbild eines Kurzfaserbruchs aufgrund von Rindeneinwuchs im Rahmen der Biegeprüfung, Vollholzprobe



Abbildung B-2: Bruchbild eines Kurzfaserbruchs ohne Ast im Rahmen der Biegeprüfung, Vollholzprobe

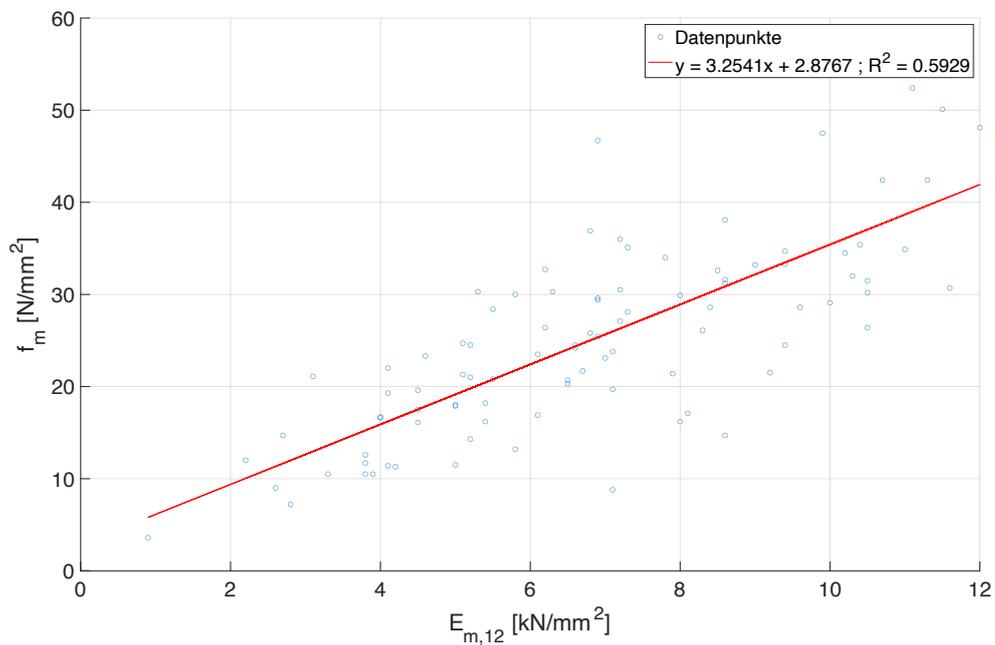


Abbildung B-3: Lineare Regression zwischen f_m und $E_{m,lokal,12}$ (n = 95)

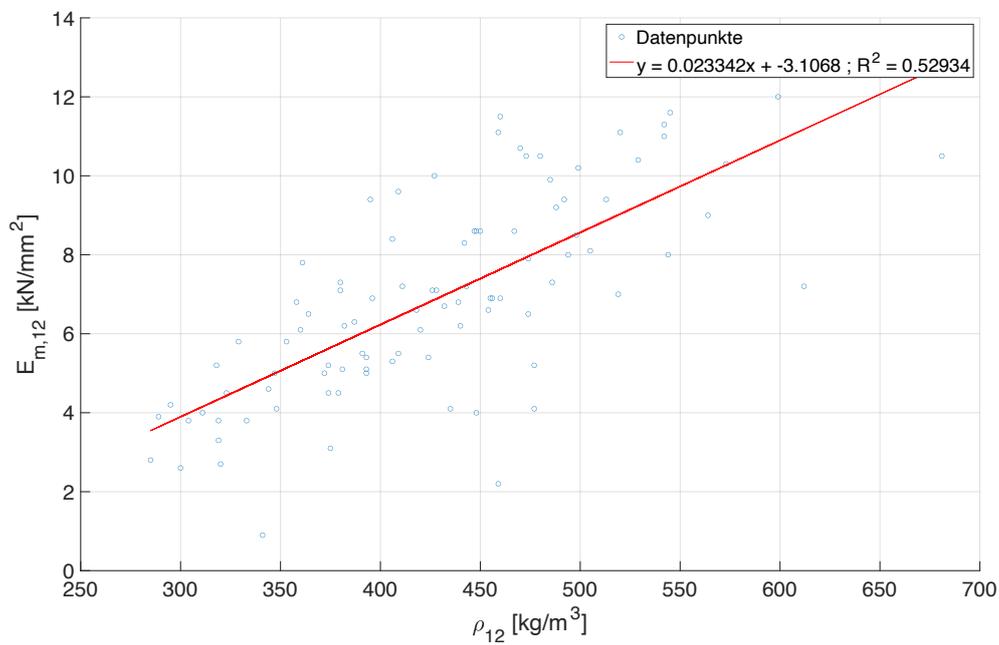


Abbildung B-4: Lineare Regression zwischen $E_{m,lokal,12}$ und $\rho_{m,12}$ (n = 95)

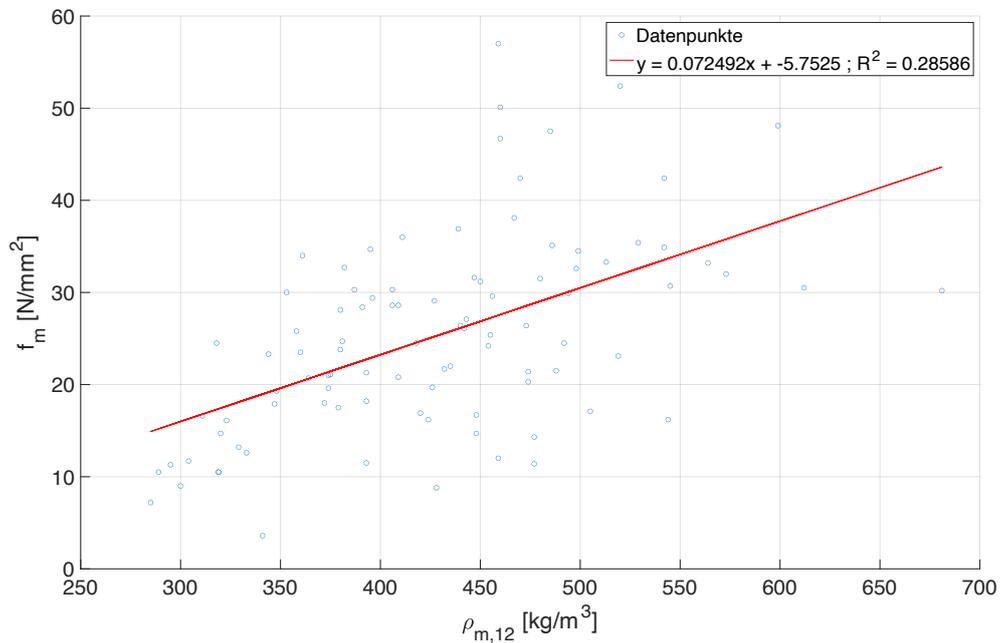


Abbildung B-5: Lineare Regression zwischen f_m und $\rho_{m,12}$ (n = 95)

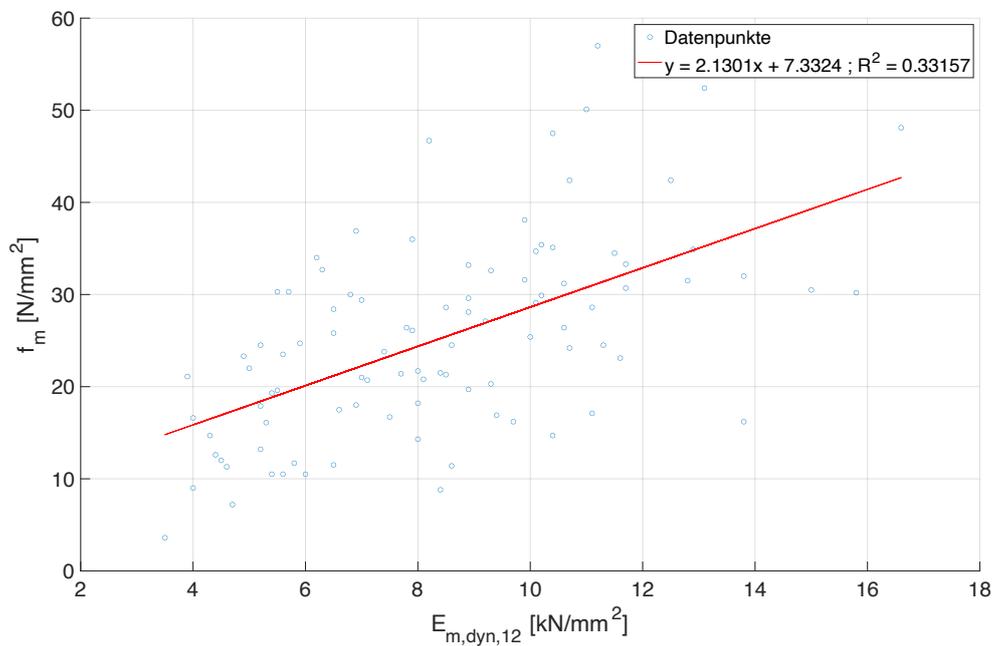


Abbildung B-6: Lineare Regression zwischen f_m und $E_{m,dyn,12}$ (n = 95)

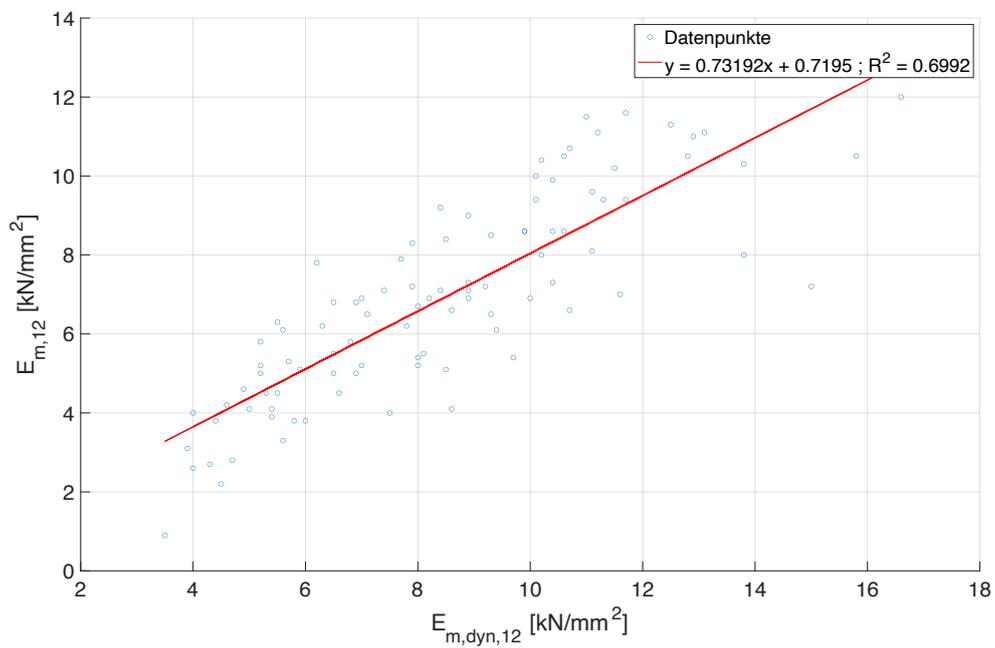


Abbildung B-7: Lineare Regression zwischen $E_{m,lokal,12}$ und $E_{m,dyn,12}$ (n = 95)

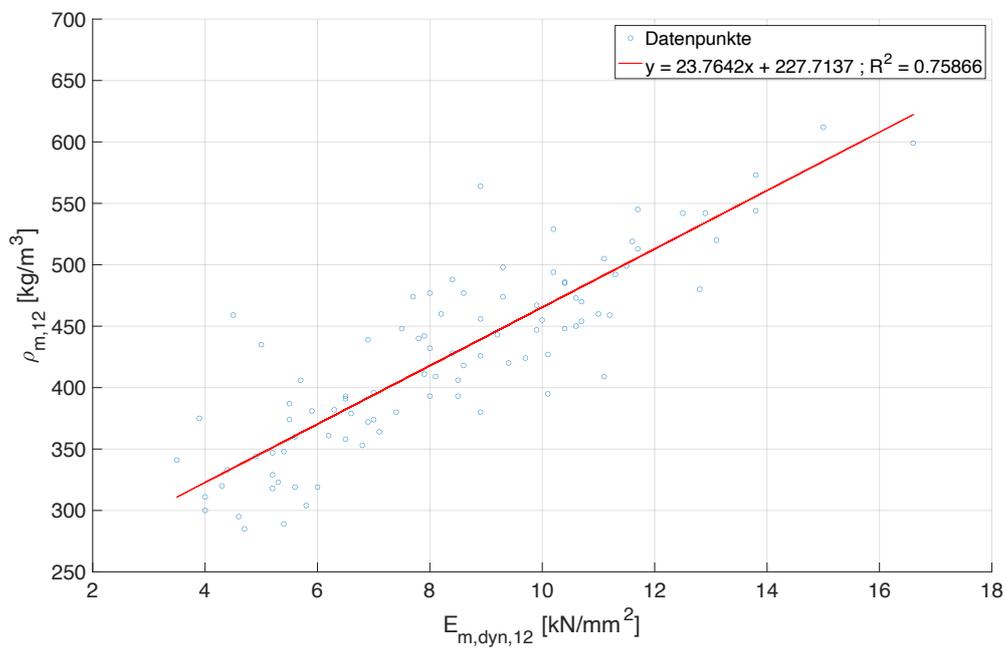


Abbildung B-8: Lineare Regression zwischen $\rho_{m,12}$ und $E_{m,dyn,12}$ (n = 95)

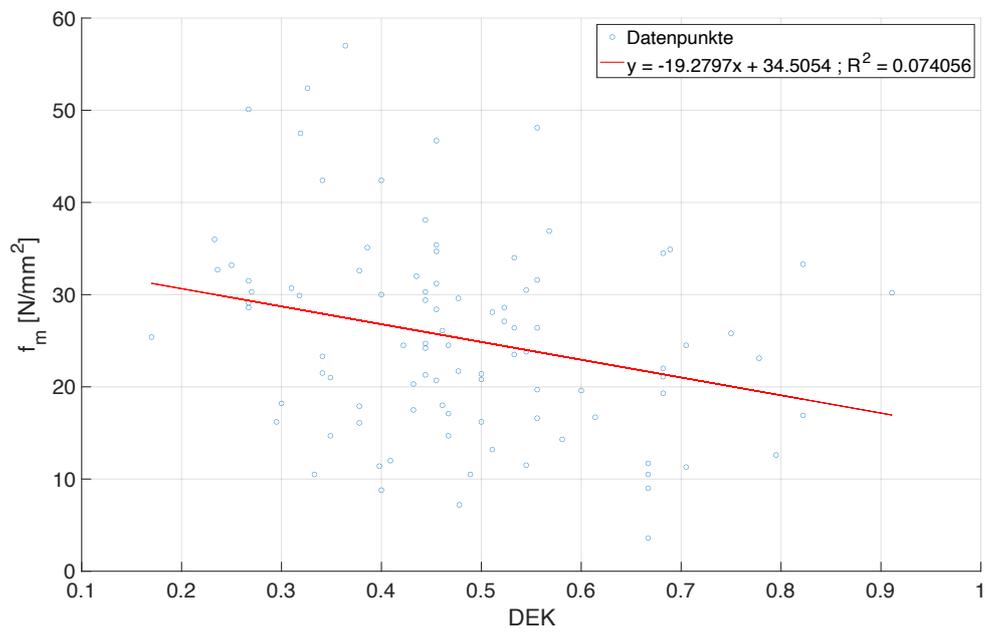


Abbildung B-9: Lineare Regression zwischen f_m und DEK (n = 95)

Tabelle B-1: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimalen Sortierung für ausgewählte Biegefestigkeitsklassenkombinationen, n = 95

Klasse 1	Ausbeute - Klasse 1			Klasse 2	Ausbeute - Klasse 2			Klassen- kombination	Ausbeute insgesamt
	Festigkeit	E-Modul	Rohdichte		Festigkeit	E-Modul	Rohdichte		
C14	0,87	0,81	0,48	-				C14	0,87
C16	0,71	0,61	0,24	-				C16	0,71
C18	0,44	0,41	0,06	C18-C14	0,06	0,00	0,00	C18-C14	0,50
C20	0,29	0,25	0,06	C20-C14	0,39	0,34	0,00	C20-C14	
C22	0,11	0,21	0,06	C22-C14	0,42	0,48	0,00	C22-C14	0,69
C24	0,05	0,09	0,00	C24-C16	0,45	0,32	0,17	C24-C16	0,54
C24	0,05	0,09	0,00	C24-C14	0,78	0,69	0,18	C24-C14	0,87
C27	0,03	0,08	0,00	C27-C16	0,47	0,53	0,18	C27-C16	0,61
C27	0,03	0,08	0,00	C27-C14	0,79	0,73	0,19	C27-C14	0,87
C30	0,00	0,00	0,00	-				C30	0,00
C30	0,00	0,00	0,00	-				C30	0,00

Tabelle B-2: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der optimierten Sortierung für Biegefestigkeitsklassen, Angaben zu Grenzwerten der Sortierparameter (DEK, JRB), n = 95

Jahring- breite [mm]	DEK															
	1,0		0,9		0,8		0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	C-Klasse														
28	1,00	-	0,99	-	0,97	-	0,92	-	0,81	-	0,62	-	0,32	-	0,12	C14
26	0,99	-	0,98	-	0,96	-	0,92	-	0,81	-	0,62	-	0,32	-	0,12	C14
24	0,99	-	0,98	-	0,96	-	0,92	-	0,81	-	0,62	-	0,32	-	0,12	C14
22	0,96	-	0,95	-	0,93	-	0,88	-	0,80	-	0,61	-	0,32	-	0,12	C14
20	0,94	-	0,93	-	0,91	-	0,87	-	0,79	-	0,60	-	0,32	-	0,12	C14
18	0,87	-	0,86	-	0,84	-	0,81	-	0,73	-	0,57	-	0,29	-	0,12	C14
16	0,81	-	0,80	-	0,78	-	0,75	-	0,66	-	0,52	-	0,29	-	0,12	C24
14	0,75	-	0,74	-	0,72	-	0,68	-	0,61	-	0,49	-	0,28	-	0,12	C24
12	0,67	-	0,66	-	0,64	-	0,61	-	0,55	-	0,45	-	0,26	-	0,11	C14
10	0,53	-	0,52	-	0,49	-	0,47	-	0,44	-	0,38	-	0,22	-	0,08	C14
8	0,44	-	0,43	-	0,41	-	0,39	-	0,36	-	0,31	-	0,20	-	0,06	-
6	0,33	C14	0,32	C14	0,31	C14	0,28	C14	0,26	-	0,22	-	0,13	-	0,03	C16
4	0,11	-	0,09	-	0,09	-	0,09	-	0,09	-	0,08	-	0,03	-	0,01	-

Tabelle B-3: Ausbeuten von ausgewählten Biegefestigkeitsklassenkombinationen für die Festigkeitssortierung nach IP_1 , IP_2 und IP_3 , $n = 95$

Klasse 1	Ausbeute - Klasse 1			Klasse 2	Ausbeute - Klasse 2			Klassenkombination	Ausbeute - insgesamt		
	IP1	IP2	IP3		IP1	IP2	IP3		IP1	IP2	IP3
C14	0,48	0,51	0,49	-				C14	0,48	0,51	0,49
C16	0,43	0,45	0,25	-				C16	0,43	0,45	0,25
C18	0,04	0,21	0,17	C18-C14	0,44	0,27	0,00	C18-C14	0,48	0,48	0,17
C20	0,00	0,00	0,11	C20-C14	0,00	0,00	0,15	C20-C14	0,00	0,00	0,26
C22	0,00	0,00	0,09	C22-C14	0,00	0,00	0,16	C22-C14	0,00	0,00	0,25
C24	0,00	0,00	0,00	C24-C16	0,00	0,00	0,00	C24-C16	0,00	0,00	0,00
C24	0,00	0,00	0,00	C24-C14	0,00	0,00	0,00	C24-C14	0,00	0,00	0,00
C27	0,00	0,00	0,00	C27-C16	0,00	0,00	0,00	C27-C16	0,00	0,00	0,00
C27	0,00	0,00	0,00	C27-C14	0,00	0,00	0,00	C27-C14	0,00	0,00	0,00

Tabelle B-4: Ausbeuten der Sortierklassen auf Grundlage der kombinierten Sortierung für Biegefestigkeitsklassen, Angaben zu den Grenzwerten der Sortierparameter (IP_1 , IP_2 , DEK), $n = 95$

IP1 [kN/mm ²]	DEK															
	1,0		0,9		0,8		0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	C-Klasse														
3	1,00	-	0,99	-	0,97	-	0,92	-	0,81	-	0,62	-	0,32	-	0,12	C14
4	0,97	-	0,96	-	0,94	-	0,88	-	0,81	-	0,62	-	0,32	-	0,12	C14
5	0,89	-	0,88	-	0,86	-	0,83	-	0,76	-	0,58	-	0,31	-	0,12	C14
6	0,75	-	0,74	-	0,72	-	0,68	-	0,64	-	0,49	-	0,26	-	0,11	-
7	0,64	-	0,63	-	0,61	-	0,59	-	0,56	-	0,44	-	0,24	-	0,09	-
8	0,54	-	0,53	-	0,51	-	0,48	-	0,46	-	0,37	-	0,21	-	0,07	-
9	0,39	C16	0,38	C14	0,36	C16	0,34	C16	0,32	C14	0,25	C14	0,16	C14	0,05	-
10	0,31	C16	0,29	C16	0,28	C16	0,26	C16	0,24	C16	0,20	C14	0,13	C16	0,03	C14
11	0,18	C16	0,17	C14	0,16	C14	0,14	C14	0,12	C14	0,08	-	0,05	C20	0,01	-
12	0,09	C16	0,08	C14	0,08	C14	0,08	C14	0,07	C14	0,05	-	0,03	C18	0,01	-
13	0,06	-	0,05	-	0,05	-	0,05	-	0,05	-	0,03	-	0,01	-	0,00	-
14	0,03	C14	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,02	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
15	0,02	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
16	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-

IP3 [kg/m ³]	DEK															
	1,0		0,9		0,8		0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Ausbeute	C-Klasse														
300	1,00	-	0,99	-	0,97	-	0,92	-	0,81	-	0,62	-	0,32	-	0,12	C14
350	0,92	-	0,91	-	0,88	-	0,84	-	0,77	-	0,58	-	0,31	-	0,12	C14
400	0,80	-	0,79	-	0,77	-	0,73	-	0,68	-	0,53	-	0,27	-	0,12	C14
450	0,54	-	0,53	-	0,51	-	0,48	-	0,44	-	0,35	-	0,20	-	0,06	-
500	0,27	C14	0,26	C14	0,25	C14	0,23	C14	0,20	C14	0,17	C14	0,12	C14	0,03	C16
550	0,09	C22	0,08	C20	0,08	C20	0,07	C22	0,06	C22	0,04	C22	0,02	-	0,01	-
600	0,02	C16	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
650	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
700	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-

Anhang C

– Vergleich der Festigkeitsprofile –

Tabelle C-1: Prüfkörperanzahl (PK-Anzahl), charakteristische Festigkeitswerte, Festigkeitsklassen und Festigkeitsverhältnisse mit den Grenzwerten aus der maschinellen Sortierung des Zugkollektivs

Grenzwerte (Zugkollektiv)	Zugkollektiv			Biegekollektiv			$f_{t,0,k} / f_{m,k}$
	PK-Anzahl	5%-Quantil	T-Klasse	PK-Anzahl	5%-Quantil	C-Klasse	
IP1 > 6,7 kN/mm ²	61	8,0	T8	64	13,8	-	0,58
IP2 > 8,1 kN/mm ²	48	8,1	T8	49	13,0	-	0,62
IP3 > 468 kg/m ³	41	8,2	T8	48	13,1	-	0,63

Tabelle C-2: Prüfkörperanzahl (PK-Anzahl), charakteristische Festigkeitswerte, Festigkeitsklassen und Festigkeitsverhältnisse mit den Grenzwerten aus der maschinellen Sortierung des Biegekollektivs

Grenzwerte (Biegekollektiv)	Zugkollektiv			Biegekollektiv			$f_{t,0,k} / f_{m,k}$
	PK-Anzahl	5%-Quantil	T-Klasse	PK-Anzahl	5%-Quantil	C-Klasse	
IP1 > 8,3 kN/mm ²	44	8,6	T8	46	15,2	C14	0,57
IP1 > 8,8 kN/mm ²	40	8,5	T8	41	16,3	C16	0,52
IP2 > 8,2 kN/mm ²	46	7,9	-	48	14,1	C14	0,56
IP2 > 8,4 kN/mm ²	43	8,2	T8	43	16,1	C16	0,51
IP3 > 475 kg/m ³	35	8,2	T8	47	14,2	C14	0,58
IP3 > 502 kg/m ³	25	7,7	-	24	17,9	C16	0,43