

Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik
der Studienfakultät Forstwissenschaften und Ressourcenmanagement
der Technischen Universität München

Untersuchungen zur hochauflösenden Bestimmung von qualitätsbeeinflussenden
Rundholzmerkmalen
am Beispiel von Fichten- und Buchenholz

Andreas Nikolaus Kleinschmit von Lengefeld

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt
der
Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Forstwissenschaft
(Dr. rer. silv.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Peter Glos
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. Gerd Wegener
2. Privatdozent Dr. Christian Ammer

Die Dissertation wurde am 31.01.2005 bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt
am 26.04.2005 angenommen.

Danksagung

Mein tiefster und herzlichster Dank geht an Prof. Dr. Dr. habil. Dr. h.c. Gerd Wegener für sein großes Vertrauen. Seine Offenheit, sein großes Interesse und sein großes Engagement werden mir in bester Erinnerung bleiben und Vorbild sein. Danken möchte ich ihm besonders dafür, mir bei organisatorischen und fachlichen Fragen stets zur Seite gestanden zu haben.

Bedanken möchte ich mich beim Kuratorium der Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, das dieses Projekt finanzierte und stets großes Interesse an dem Forschungsvorhaben zeigte. Dabei gilt mein besonderer Dank Frau Margret Kolbeck für die Hilfe bei organisatorischen Fragen!

Den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München, Herrn Professor Pretzsch und vor allem Herrn Rajko Schermer danke ich für die Zusammenarbeit bei der Auswahl der Probeflächen und Probebäume für diese Untersuchung.

Herrn Baierl als Leiter der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald in Zwiesel gilt mein besonderer Dank für die Unterstützung während der Aufnahmen im Bestand und ein ganz herzliches und tiefes Dankeschön geht an Manfred und Martin von der Nationalparkverwaltung in Zwiesel, die ihr beeindruckendes Können mit der Motorsäge bei der Probengewinnung im Bestand demonstrierten.

Frau Christine Pietsch, ehemalige Mitarbeiterin am Klinikum Rechts der Isar, gilt mein besonderer Dank für eine unbürokratische, sehr professionelle und fachliche Unterstützung bei den CT-Aufnahmen.

Ausdrücklich möchte ich mich bei dem Institut für Radiochemie der Technischen Universität München in Garching bedanken. Vor allem bei Herrn Dr. Lierse von Gostomski und bei Frau Elwira Kutlar, für die Herstellung der Kontakte zur BAM in Berlin und zu Daimler Chrysler in Stuttgart, sowie für die aktive und sehr wertvolle Unterstützung bei den CT-Aufnahmen und der Einarbeitung in das Softwareprogramm Volume Graphics.

Den Herren Maier und Jakobi von Daimler Chrysler in Untertürkheim gilt der ausdrückliche Dank für Ihre Unterstützung mit der Durchführung von Volumenaufnahmen an ihrem Kegelstrahltomographen. Ohne ihr Engagement wären interessante Teile dieser Arbeit nicht zustande gekommen.

Der Firma Volume Graphics Heidelberg gilt mein Dank für die Überlassung einer temporären Lizenz ihre Software VG Studio 1.0, mit deren Hilfe die Auswertung erst möglich wurde.

Ein ‚dickes Dankeschön‘ für eine sehr wertvolle und schöne Teamarbeit geht an die ‚stillen Stars‘ der Holzforschung München, die mich auf allen Wegen dieser Arbeit ebenso wie ihr ‚Kapitän‘ Wegener begleiteten. Vielen Dank gebührt den Herren Georg Gaede, Markus Säcker, Ralf Rosin, Rajko Pietzsch, den Werkstätten für Holz und Metall, die von den Herren Bruno Fischer, Roland Braun, Man-

fred Binder und Wolfgang Weber betreut werden. All diesen genannten Mitarbeitern verdanke ich über die Jahre eine fantastische Unterstützung. Das gleiche möchte ich den wissenschaftlichen Hilfskräften, den Herren Christof Richter, Peter Linsenmann, Thomas Näher sowie den studentischen Hilfskräften Isabella, Iris, Ira, Steffi, Manuel, Stefan, Andreas und last but not least - the one and only ‚Ersti‘, Lena aussprechen.

Es war mir stets eine große Freude in diesem Team arbeiten zu dürfen und für das entgegengebrachte Vertrauen von allen Beteiligten zeige ich meine tiefe Dankbarkeit.

Okay – a special Thank you! to the Mayo-Master (04) Olaf Strehl (eines Tages wird Schalke Meister). Noch nie waren Excel-Macros so schön wie Deine. Die Schleife sei mit Dir!

Herrn Rainer Hartmann ein spezielles Dankeschön für die Diskussionen über die statistischen Ergebnisse.

Herr Johannes Reiter geht ein DANKE! nicht nur für fachliche Diskussionen sondern auch für eine sehr angenehme und humorvolle Zusammenarbeit in der Holzforschung.

Den Forstwissenschafts-Studenten, die sich mit Teilfragen dieser Untersuchung in ihren Diplomarbeiten beschäftigten, geht ein tiefer Dank für ihr Engagement und die sehr gute Zusammenarbeit. Nochmals Danke an Frank Günsche, Thomas Näher und Andreas Hahn.

Herrn Dr. Goebbels von der BAM in Berlin gilt mein Dank für seine Unterstützung in Fachfragen zu CT-Anwendungen.

Frau Alexandra Kinter von Siemens Forum München bekommt ein Dankeschön für ihre Unterstützung bei der Literatur-Recherche zur Computertomographie.

Diese Arbeit widme ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich bis heute selbstlos unterstützt und begleitet haben!

Zur Erinnerung an Tante Nulle!

München, im Januar 2005

Abstract

English:

The following scientific investigation concentrates on the development and testing of a high resolutional concept for the analysis of roundwood quality. It is tested on spruce (*Picea abies* L. (Karst)) and beech (*Fagus sylvatica* L.).

The high resolutional concept includes following investigations in the field of wood science: year ring measurement, density measurement, strength testing on error-free samples, knottiness, reaction wood in spruce wood and optional colouring in beech wood.

Computertomography as a non-destructive testing method is tested on beech wood. The high resolution of this technology is investigated to be applicable for detecting e.g. knottiness, density features in the roundwood and the optional colouring of beech.

Deutsch:

Diese wissenschaftliche Untersuchung konzentriert sich auf die Entwicklung und Erprobung eines Konzeptes für die hochauflösende Erfassung von Rundholzqualitätsparametern. Das Konzept wurde an Fichte (*Picea abies* L. (Karst)) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) entwickelt und erprobt. Als Grundlage für die Entwicklung dienten folgende holzkundliche Untersuchungen: Jahrringanalyse, innere Astigkeit, die Bestimmung von Reaktionholz an Fichte sowie des fakultativen Rotkernes an Buche, die Bestimmung der Rohdichte, des Biege-E-Moduls als auch der Biege-Festigkeit an fehlerfreien Proben bei beiden Baumarten.

An Buchenholz wurde der Einsatz von hochauflösenden Computertomographen getestet. Diese zerstörungsfreie Methode wurde auf ihren Einsatz für die Erfassung der Rundholzqualitätsparameter untersucht.

Inhaltsangabe

1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung	3
2 Kenntnisstand	4
2.1 Rundholzqualität	4
2.2 Innere Astigkeit	5
2.3 Reaktionsholz (Fichte)	6
2.4 Rohdichte [ρ_{12}]	7
2.5 Radiale Jahrringbreite	8
2.6 Elasto-mechanische Eigenschaften – Biegefestigkeit und Biege-E-Modul	9
2.7 Dichteabhängige Merkmalsausprägungen (CT)	10
2.8 Physikalische Kenngrößen der Baumarten Fichte und Buche	12
2.9 Forstliche Aspekte	13
3 Material und Methoden	15
3.1 Versuchsprogramm und Auswahlverfahren	15
3.2 Auswahl der Probestämme auf den Versuchsflächen und Aufnahmen am gefällten Probebaum	16
3.3 Stichprobenkonzept zur Erfassung der Rundholzqualität an Fichte und Buche	17
3.4 Probenmaterial und Prüfkörper	18
3.5 Untersuchte Kenngrößen	22
3.5.1 Innere Astigkeit	22
3.5.2 Reaktionsholz (Fichte)	23
3.5.3 Rohdichte [ρ_{12}] nach DIN 52 182 (radial)	25
3.5.4 DIN 52 186: [Biege-] Festigkeit [N/mm ²], E-Modul [N/mm ²], Rohdichte [ρ_{12}] (tangential)	26
3.5.5 Messung der radialen Jahrringbreiten	28
3.6 Die Anwendung von CT-Verfahren zur hochauflösenden Erfassung und Darstellung von Rundholzqualitätsmerkmalen	29
3.6.1 Kurzporträt der verwendeten Computertomographen	29
3.6.2 Rekonstruktion der gemessenen Daten	31
3.6.3 Artefakte	31
3.6.4 Referenzkörper	31
3.6.5 Rindenbild	32
3.6.6 Äste	32
3.6.7 Mondkrater	33
3.6.8 Rotkern	33
3.6.9 Weitere Untersuchungsansätze	33
3.6.10 Verwendete Software	34

3.6.11 Spezielle Anwendungen der Software ‚VGStudio 1.0‘ der Firma Volume Graphics	35
4 Ergebnisse	37
4.1 Innere Astigkeit Fichte	37
4.2 Reaktionsholz Fichte – Zwiesel 134 und Zwiesel 135	45
4.3 Rohdichte [ρ_{12}] nach DIN 52 182 (radiale Messung) an Fichte – Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135	47
4.3.1 Mittlere Rohdichte [ρ_{12}]	47
4.3.2 Anzahl Jahrringe pro Prüfkörper (Fichte)	53
4.3.3 Einzelbaumweise Auswertung: Min, Mittel, Max.	59
4.4 Biegeprüfung nach DIN 52 186 - Fichte	65
4.5 Biegeprüfung nach DIN 52 186 - Buche	96
4.6 Computertomographische Aufnahmen an Buche	127
4.6.1 Innere Astigkeit	127
4.6.2 Mondkrater	132
4.6.3 Rotkern	137
4.6.4 Besondere Merkmalsausprägungen im Rundholzkörper	141
4.6.5 Das Erkennen von Holzmerkmalen unter Anwendung der Software ‚VGStudio 1.0‘ der Firma Volume Graphics	147
4.6.6 Die Verwendung eines Gradientenfilters für die Erkennung von Qualitätsmerkmalen im Rundholzkörper	152
5 Diskussion	154
5.1 Innere Astigkeit [Fichte]	154
5.2 Reaktionsholz [Fichte]	155
5.3 Rohdichtemessung	156
5.3.1 Rohdichte und Jahrringbreite (radiale Rohdichtemessung)	156
5.3.2 Radiale Messung der mittleren Rohdichte [Fichte]	157
5.3.3 Tangentiale Messung der mittleren Rohdichte	158
5.4 Biegefestigkeit [N/mm^2] und E-Modul [N/mm^2] [beide Baumarten]	160
5.5 Computertomographie	162
5.5.1 Innere Astigkeit	162
5.5.2 Parabel mit erhöhter Dichte bei Ästen	164
5.5.3 Zusammenhang Rindenbild und Astigkeit	164
5.5.4 Mondkrater	165
5.5.5 Rotkern	166
5.5.6 Dichtepprofile	167
5.5.7 Jahrringe	167
5.5.8 Holzfeuchte	168
5.5.9 Dichteerhöhungen im Holzkörper	168
6 Ausblick	169
7 Zusammenfassung	170
8 Literaturverzeichnis	172

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Rundholzqualität des nachwachsenden Rohstoffes Holz gewinnt stetig an Bedeutung. Ein Grund hierfür liegt in den Veränderungen seiner Be- und Verarbeitung, denn parallel zu den innovativen Entwicklungen in den Bearbeitungstechnologien der mechanischen Holzindustrie, werden sich die Anforderungen an die jeweiligen Rohstoff- bzw. Rundholzqualitäten verändern. Sie müssen so weit wie möglich an die Erfordernisse des Marktes angepasst werden.

In der Vergangenheit waren Holzmerkmale unterschiedlich vom Markt bewertet worden (GRAMMEL, 1990, 1995; BECKER 1995, 1999). Allerdings waren Qualitätsmerkmale wie z. B. die Dichte, die Astreinheit sowie der gleichmäßige, innere Holzaufbau unverändert konstant wichtige, wertbestimmende Qualitätsparameter. Die Erfassung möglichst vieler dieser Rundholzqualitätsparameter im Verarbeitungsbetrieb wird in Zukunft die Basis für eine Reihe von Verarbeitungsprozessen bilden, wodurch die Ausgangslage für eine optimierte Verwertung und Wertschöpfung geschaffen wird.

Der Trend der Qualitätsansprache des nachwachsenden Rohstoffs Holz spiegelt sich auf den nationalen und internationalen Holzmärkten wider. Rundhölzer werden in Hinblick auf ihren Einsatz und ihre Verwendung mit dem Ziel eine zunehmend gesicherte Qualität der Eigenschaften der zu erwartenden Produkte zu garantieren, gehandelt. Die Nachfrage nach Produkten mit genau definierten Eigenschaften spielt im Holzsektor schon heute eine bedeutende Rolle (z. B. im konstruktiven Holzbau).

In der Bundesrepublik Deutschland sind allein schon wegen ihres mengenmäßig großen Vorkommens zwei der wichtigsten Wirtschaftsbaumarten von außerordentlicher Bedeutung, die Fichte (*Picea abies* L. (Karst)) und die Buche (*Fagus sylvatica* L.). Beide Baumarten dominieren deutlich die deutschen Forste, wobei letztere in Zukunft eine starke Zunahme durch die Begründung von Mischbeständen erhalten wird.

Betrachtet man beide Baumarten gegeneinander, so unterscheiden sie sich in ihrer derzeitigen Verwendung und Einsatz sehr deutlich.

Die Fichte zeigt ein breiteres Verwendungsspektrum, da sie u. a. sowohl als Rohstoff für die Zellstoff- und Papierproduktion als auch für die Herstellung von hochwertigen Konstruktionselementen im Bauwesen. ihren Einsatz findet. Letzteres vor allem dann, wenn genau definierte Festigkeitswerte erreicht und garantiert werden können.

Qualitäten bei Rundholz-Massensortimenten (z. B. für die Spanplattenherstellung) wurden in der Vergangenheit außer Acht gelassen. Hier zeigt sich aber durch veränderte Produktionsbedingungen, das der Anspruch an den Rohstoff stetig zunimmt wie z. B. bei Waldholz für die Holzschliffherstellung.

Die Verwendung der Buche beschränkte sich in der Vergangenheit traditionell in erster Linie auf die Möbel- und Furnierindustrie. Ihr Einsatz in der Zellstoff- und Papierindustrie ist volumenmäßig marginal im Vergleich zur Fichte. Als Rohstoff für die Herstellung von Cellulosederivaten und Regeneratcellulosen hat sie eine große Bedeutung und sie zeigt ein großes Potential für neue Holzproduktentwicklungen. In der Bundesrepublik Deutschland ist sie die wichtigste Laubholzart für die Spanplattenproduktion.

In Zukunft wird sie bei den derzeitigen Entwicklungen im Energiesektor aufgrund ihrer höheren Energiedichte als Substitution für fossile Energieträger ein bisher nicht vollends ausgeschöpftes Potenzial mit sich bringen.

Betrachtet man die Verwendungen und den Einsatz von Fichte und Buche, so ergeben sich daraus spezielle Anforderungen an die jeweilige Rundholzqualität. Veränderungen in der Verarbeitung und neue Produktentwicklungen benötigen in Zukunft eine bessere, breitere und gesichertere Datengrundlage um den nachwachsenden Rohstoff Holz eine bestmögliche Wertschöpfung und hierdurch einen wirtschaftlich nachhaltigen Erfolg zu sichern.

Die Erfassung der Rundholzqualität spielt zusätzlich eine wichtige Rolle in den veränderten Produktionsbedingungen der Forstwirtschaft. Seit Beginn der Neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts wird in der Forstpraxis aufgrund des großen wirtschaftlichen Schadens durch abiotische und biotische Faktoren (in erster Linie Windwürfe und Insektenkalamitäten) die Umwandlung von einschichtigen, einstufigen Reinbeständen der Fichte in stabilere Mischbestände forciert. Diese Maßnahmen erfordern neue waldbauliche Behandlungskonzepte, die in Hinblick auf

die zu erwartenden Stabilitäten und Holzqualitäten der Bestände erst noch erprobt und verifiziert werden müssen. Die Aufgabe besteht darin, dass „[...] man die Holzeigenschaften [Holzqualitäten] zukünftig automatisch, stufenlos und zuverlässig messen können[...] [wird]“ (GRAMMEL, 1990).

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines experimentellen, hochauflösenden Untersuchungs- und Auswertungskonzeptes. Die Anwendung dieses Konzeptes soll eine präzise Erfassung und Beschreibung der wichtigsten Rundholzqualitätsparameter an Fichte und Buche entlang des wirtschaftlich momentan wertvollsten Stammstückes, ermöglichen. Das generierte Datenmaterial, welches aus unterschiedlichen Experimenten entsteht, soll die Basis für hochauflösende Einzelbaumprofile zur Charakterisierung ihrer jeweiligen Rundholzeigenschaften bilden. In experimentellen Untersuchungen zur Rundholzqualität wurde bisher noch nicht der Ansatz verfolgt, losgelöst von konkreten Fragestellungen, wie. z. B. des Einflusses von verschiedenen Standorten oder Provenienzen auf die Rundholzqualität, ein hochauflösendes Konzept zu entwickeln. Dieser Ansatz soll die Auswertung und Bearbeitung einer Matrix von Informationen erfüllen, mit dessen Hilfe eine sehr breite Analyse und Beantwortung nicht nur von herkunfts- als auch verwendungsrelevanten Fragen möglich sein kann.

Die Entwicklung eines solchen Konzeptes zur Erfassung der Rundholzqualität von wirtschaftlich bedeutenden Baumarten (hier Fichte und Buche) wird sowohl dem Waldbesitzer (Produzenten), der Holzindustrie (Veredelungsstufe) und letztlich dem Endverbraucher (Konsumenten) in ihren unterschiedlichen Ansprüchen und Anforderungen an den nachwachsenden Rohstoff von Nutzen sein, da mit dieser Informationsbasis, ihre spezifischen Fragen beantwortet werden können.

2 Kenntnisstand

2.1 Rundholzqualität

In der Regel findet der erste Schritt einer Qualitätsansprache des nachwachsenden Rohstoffes Holz am stehenden Baum im Bestand statt (z. B. MAHLER ET AL., 2001). Diese Ansprache kann nur mit einer beschränkten Aussage auf die innere Rundholzqualität durchgeführt werden, da viele Merkmale nur äußerlich erfassbar sind.

Am gefällten, liegenden Stamm werden die visuell erfassbaren Gütekriterien in der BRD nach der Verordnung über gesetzliche Handelsklassen für Rundholz (HKS) von 1969 oder den Europäischen Normen/Vornormen zur Qualitätssortierung von Laub- und Nadelrundholz eingeteilt. Bei letztgenannten werden Gütekriterien z. T. deutlicher und präziser spezifiziert, was in Versuchen zur Anwendung der Europäischen Normen/Vornormen erfolgreich getestet wurde (SCHULZ, 1997; WEIDNER ET AL., 1999 u. 2000). Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Schätzung der Rundholzqualität am liegenden Stamm für seine Verwendung nur anhand visueller Kriterien, wie z. B. Astigkeit, Rotkern etc. durchgeführt werden kann. Erst durch die zusätzliche Kenntnis von beispielsweise physikalischen Eigenschaften, wie Dichte und elasto-mechanischen Eigenschaften wird eine gesicherte Beurteilung des nachwachsenden Rohstoffes Holz für seinen jeweiligen Verwendungszweck ermöglicht.

Rundholzqualität per se ist immer eine Definition der Rohstoffeigenschaften für seinen jeweiligen Verwendungszweck. GRAMMEL (1990) z. B. definiert sie dagegen „als Resultat aus Wuchsraum, Standort und Erbe“, was sich in der Ausprägung des Jahrringaufbaus, der Astigkeit, des Faserverlaufs etc widerspiegelt.

V. PECHMANN (1974) definiert Rundholzqualität wie folgt: „Grob zusammen gefasst bedeutet Holzqualität: gerade, konzentrische, vollholzige Schäfte, Astreinheit, Freiheit von störenden Holzfehlern, wie Risse, Drehwuchs, Reaktionsholz usw., dazu möglichst gleichmäßiges Holzgefüge und hinreichende Festigkeit, die wieder eine entsprechende Holzdicke voraussetzt.“ Die hier angegebene Definition beinhaltet einen großen Teil der Rundholzqualitätsparameter, welche in dieser Arbeit untersucht worden sind.

Bei beiden Baumarten, Fichte und Buche wurden die verwendungsrelevantesten Kenngrößen für eine Beschreibung ihrer Rundholzqualitäten analysiert. Diese Qualitätsparameter sind:

- Die innere Astigkeit
- Das Reaktionsholz bei Fichte (an ausgewählten Stämmen)
- Die Rohdichte
- Die Biegefestigkeit
- Der Biege-E-Modul

2.2 Innere Astigkeit

Die Bedeutung der Astigkeit im Rundholzkörper und im Schnittholz belegt sich durch zahlreiche holzkundliche Untersuchungen, die diese zur Charakterisierung und Beurteilung des nachwachsenden Rohstoffs verwendeten (z. B. bei BRUNN, 1932; KÖSTER, 1934; TRENDELENBURG U. MEYER-WEGELIN, 1955; SCHULZ, 1961; V. PECHMANN U. SHAILE, 1955; V. PECHMANN ET AL. 1963; BERNHART, 1964; LÖFFLER, 1966; BÖHLMANN, 1970; ZU DROSTE-HÜLSHOFF, 1970; LIPPEMEIER, 1972; V. PECHMANN, 1974; V. AUFSSESS, 1975; LEWARK, 1981; DÜRRSTEIN, 1984; SCHULZ, 1986; BUES, 1990 U. 1996; SCHUMACHER; 1993; GLOS U. TRATZMILLER 1996 U. 1997, SCHUMACHER ET AL., 1997; GLOS U. LEDERER, 2000; SEELING, 2001, GLOS ET AL., 2003).

„Das entscheidende und durch die Forstwirtschaft beeinflussbare Grundmerkmal wertvoller, vielseitig verwendbarer Holzsorten, auf welchem die Beurteilung der Qualitätsentwicklung [junger] Bäume aufbauen muss, sind dicke ast- und fehlerfreie Holzschichten“ (SCHULZ, 1961). Die innere Astigkeit stellt „nach übereinstimmender Meinung vieler Autoren (z. B. TRENDELENBURG UND MEYER-WEGELIN 1955; LÖFFLER 1966, LIPPEMEIER 1972, SCHULZ 1986) ein entscheidendes Kriterium für die Rundholzqualität dar, da sie verschiedenartige Abweichungen im Holzaufbau bewirkt (BUES, 1990). Die Astigkeit ist ein wichtiges Kriterium für die Rund- und Schnittholzsortierung. DÜRRSTEIN (1984) erkennt in ihr den ‚weitaus wichtigsten gütemindernden Faktor‘ für die Holzverwendung. BUES (1996) fordert aus Sicht der Holzverwendung astreine Holzschichten von mindestens 10 bis 15 [cm] Dicke

als wünschenswert. Die Auswirkungen der Äste auf die Struktur des Rundholzkörpers verursacht häufig Probleme in der Verwendung des Rohstoffs.

Die astigen Holzzonen sind in der Regel gekennzeichnet durch Störungen des Faserverlaufs, unregelmäßigen Jahrringbau, unterschiedliche Zellartenverteilungen, Schwankungen der Rohdichte und häufige Verbindungslosigkeit zwischen Ast und umgebenden Stammholz (KNIGGE UND SCHULZ, 1966). Im Gegensatz zu anderen Qualitätsmerkmalen spielt sie daher im Schnittholz eine höhere Rolle als z. B. Festigkeitseigenschaften oder die Rohdichte (GLOS U. TRATZMILLER 1996 U. 1997; GLOS U. LEDERER, 2000).

GÜNSCHE (2000) hat in seiner Arbeit anhand einer Literaturrecherche dargestellt, welche Rundholzqualitätsparameter für die Baumart Buche einen Schwerpunkt in wissenschaftlichen Untersuchungen in der Vergangenheit besessen haben. Die hohe Anzahl an Untersuchungen zur Astigkeit mit verschiedensten Fragestellungen unterstreichen die Bedeutung dieses Qualitätsparameters.

2.3 Reaktionsholz (Fichte)

In der Verwendung von Fichtenholz ist das Vorkommen von Reaktionsholz, welches in der Praxis auch Druckholz, Buchs, Rothartes oder Rotholz, Quarzholz oder nagelhartes Holz genannt wird von hoher Bedeutung. Seine Erfassung und Auswirkungen auf andere Holzeigenschaften waren Gegenstand von holzkundlichen Untersuchungen bei z. B. MÜNCH, 1937; ABETZ U. KÜNSTLE, 1982; BELLMANN, 1982; TIMELL, 1986; BUES, 1990 U. 1996; SCHUMACHER, 1993, GLOS U. TRATZMILLER, 1997; SEELING, 1999 U. 2001; WERNSDÖRFER, 2001.

BUES (1990) sieht in dem Vorhandensein von Reaktionsholz bei Fichte den wertmindernden Holzfehler direkt nach der Astigkeit für das Rundholz.

Verschiedene Faktoren werden genannt, welche die Bildung von Reaktionsholz auslösen. Der Einfluss des Reliefs wird von MÜNCH (1937) beschrieben. BUES (1990) sieht eine einseitig vermehrte Holzproduktion im Stammquerschnitt häufig mit der Bildung von Druckholz verbunden. Demgegenüber aber stellt TIMELL (1986) fest, dass auch konzentrisch gewachsene Stämme Reaktionsholz enthalten können. Die Ergebnisse von ABETZ U. KÜNSTLE (1982) zeigen, dass der Einfluss des Standortes zusätzlich zur sozialen Stellung und der Wuchsraumregulie-

rung eine große Rolle spielt, da trotz großer Windbelastung bei ausreichender Durchwurzelung des Bodens geringere Reaktionsholzanteile vorhanden waren. Bei Fichte kann das Reaktionsholz eine bis zu 50% höhere Dichte des Holzes verursachen (KNIGGE 1958, BODIG U. JAYNE, 1993, zit. nach SEELING 2001). Eine Abnahme der elasto-mechanischen Eigenschaften, vor allem der Festigkeit schreibt SEELING, (1999) der Bildung von Reaktionsholz zu.

2.4 Rohdichte [ρ_{12}]

Bereits aus dem 18. Jahrhundert ist Literatur vorhanden, die in der Dichte des Holzes die wichtigste Kenngröße für die baugewerbliche Güte des Holzes sieht (BUFFON 1749-1788, DUHAMEL DU MONCEAU 1700-1782 und erst recht CHEVANDIER und WERTHEIM 1848 sowie HARTIG 1882-1901, zit. n. KOLLMANN 1951). Ihre Bedeutung erhält sie wegen ihrer engen Korrelation zu anderen physikalischen Holzeigenschaften, wie z. B. der Festigkeit und dem Schwindverhalten. Im konstruktiven Holzbau spielt sie eine große Rolle für die Tragfähigkeit, bei Raumausstattungen z. B. für Abriebfestigkeit und Härte von Fußböden, bei der energetischen Nutzung von Holz für die Bestimmung des Heizwertes.

Viele Autoren untersuchten daher die möglichen Einflüsse auf die Rohdichte. Unter anderem waren der Standort, die Herkunft oder Umwelteinflüsse das zentrale Thema in diesen Untersuchungen (z. B. v. PECHMANN U. SHAILE, 1955, GÖHRE U. GÖTZE, 1956; v. PECHMANN ET AL., 1963; KOLTZENBURG, 1966; v. PECHMANN, 1974; KELLER ET AL., 1976; LEWARK, 1987; FRÜHWALD ET.AL., 1988; BUES, 1990; GIEFING U. LEWARK, 1990; GRAMMEL, 1990; SCHUMACHER, 1993; SCHUMACHER ET AL., 1997). Dabei sind gegensätzliche Ergebnisse aufgetreten, die zu keiner allgemein gültigen Aussage bezüglich des Einflusses von verschiedenen Faktoren auf die Rohdichte führen.

Einfluss des Standortes auf die Rohdichte:

Einen Einfluss des Standortes auf die Rohdichte z. B. bei Buchenholz sehen nicht alle Autoren zu diesem Thema. Innerhalb des Bayerischen Waldes z. B. wirken sich standörtliche Einflüsse auf die Holzdichte nach v. PECHMANN ET AL. (1963) kaum aus. Er kommt zu dem Ergebnis, dass „die aus anderem Material abgeleite-

te Schlussfolgerung von GÖHRE UND GÖTZE (1956), „[...] die Streuung der Rohwichtewerte zwischen den Einzelstämmen eines Standortes die Unterschiede zwischen den Standorten überdeckt“, auch für die Buchen des Bayerischen Waldes zutreffen dürfte.“ GÜNSCHE (2000) stellt in seiner Arbeit dar, wie die Ergebnisse aus der Literatur z. T. sehr widersprüchlich die verschiedenen Einflussgrößen auf die Rohdichte bei der Buche darstellen (siehe Günsche, 2000. Seite 39).

Einen Einfluss der Rohdichte auf elasto-mechanische Eigenschaften von Holz beschreibt GRAMMEL (1990). Er sieht eine enge Korrelation zwischen der Rohdichte und der Biegefestigkeit als Resultat aus Druck- und Zugvorgängen, „wie bereits die Klassiker der Holztechnologie nachgewiesen haben“. Er unterstreicht die Bedeutung der Rohdichte als physikalische Kenngröße zur Beschreibung der Holzqualität.

2.5 Radiale Jahrringbreite

Die radiale Jahrringbreite wird durch genetische Faktoren, das Alter, dem Wuchsraum, dem Standort und der Witterung beeinflusst. Die unterschiedliche Ausprägung von Jahrringbreiten ist baumartenspezifisch zu betrachten. In der Regel sind enge Jahrringbreiten auf niederschlagsarme Vegetationsperioden zurückzuführen und werden daher bei der Jahrring-Analyse als ‚Weiser-Jahre‘ verwendet (z. B. der sehr trockene Sommer 1976). Baumartenspezifisch können bei der Fichte noch Jahre nach einer trockenen Vegetationsperiode schmale Jahrringe gebildet werden. Folgende Autoren berichten von absoluten konstanten Spätholzbreiten im Jahrring der Fichte, weshalb eine Veränderung der absoluten Jahrringbreite immer von der Frühholzbildung beeinflusst sein soll (SCHULTZE-DEWITZ 1959, v. PECHMANN 1961, HARRIS 1967, KREMPL 1977, LEWARK 1981).

Bei der Buche, die zu den zerstreutporigen Laubhölzern zählt, sind diese Zusammenhänge nicht vorhanden. Als Schatten ertragende Baumart bildet sie jahrzehntelang geringe Jahrringbreiten. Nach einer Freistellung im Kronenbereich im hohen Alter, was die Bildung einer größeren Krone induzieren kann, ist sie in der Lage, danach zeitverzögert deutlich breitere Jahrringe zu bilden.

2.6 Elasto-mechanische Eigenschaften – Biegefestigkeit und Biege-E-Modul

Die elasto-mechanischen Eigenschaften von Holz spielen bei seiner Verwendung im konstruktiven Bereich eine wichtige Rolle. Bei tragenden, unter Last stehenden Bauteilen müssen bestimmte Festigkeitswerte zwingend erreicht werden. In zahlreichen Untersuchungen wurde daher ein großes Augenmerk auf die Untersuchung der Festigkeitseigenschaften von Holz sowohl an Werkstoffproben (fehlerfrei) als auch an Schnittholz in Gebrauchsabmessungen gelegt (z. B. v. PECHMANN, 1955, 1958, 1963, 1974; KOLLMANN U. KISSELOFF, 1966; KOLTZENBURG, 1966; SÜß U. MÜLLER-STOLL, 1972; SCHULZ, 1986; FRÜHWALD ET AL., 1988; MAHLER ET AL. 1988; BUES U. SCHULZ, 1989; BUES, 1990; GRAMMEL 1990; POPPER U. EBERLE, 1992; SCHUMACHER, 1993; GLOS U. TRATZMILLER, 1996 U. 1997; SCHUMACHER ET.AL, 1997; SEELING, 1999 U. 2001, GLOS U. LEDERER, 2000; v. MALDEGHEM, 2000).

Ergebnisse dieser Arbeiten führen zu der Bildung von Sortierklassen für Schnittholz, um bestimmte Festigkeitseigenschaften zu gewährleisten.

Die Biege- und Zugfestigkeit als auch der Biege- oder Zug-E-Modul werden von anderen Holzmerkmalen wie z. B. der Aststärke, der Rohdichte (GRAMMEL 1990, ZHANG 1997), dem Faserverlauf, etc. beeinflusst.

Nach BERNHART (1964) ist die Festigkeitsvariation innerhalb eines einzelnen Stammes größer als seine Rohdichtevariation. Erstere hängt aber wesentlich von letzterer ab. „Das Verhältnis zwischen Rohdichte und Festigkeit ist [...] innerhalb eines Standortes oder einer Herkunft als auch zwischen Standorten und Herkünften sehr unterschiedlich. Auf gleichen Standorten treten [...] relative Festigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Stämmen [Fichte] auf“. GRAMMEL (1990) sieht eine enge Korrelation zwischen der Rohdichte und den Festigkeitseigenschaften [...], insbesondere zur Biegefestigkeit und zum Biege-E-Modul [...]. Bei der Analyse von anderen Einflussgrößen beobachtet er eine Abnahme der Biegefestigkeit um ca. 1/3 bei Zunahme der Jahringbreite von 1-3 [mm] auf 5-7 [mm].

Bei Buche spielt der Standort als Einflussgröße eine bedeutende Rolle (KOLTZENBURG (1966), KELLER ET AL. (1976) sowie KOLTZENBURG UND KNIGGE (1987).

v. PECHMANN ET AL. (1963) entdecken eine Überlegenheit von Probestämme von Hanglagen in Zwiesel und St. Oswald gegenüber fränkischen Herkünften bei der

Bestimmung des E-Moduls an Buche. Wenn auch die Unterschiede in der Zug- und Biegefestigkeiten zwischen den verglichenen Herkunftsorten nur geringfügig und statistisch nicht gesichert sind, gewinnen sie dadurch an Aussagekraft, dass sie, ebenso wie die Prüfung der Druckfestigkeit und der Elastizität, eine Überlegenheit der gleichen Herkunft erkennen lassen.

BUES UND SCHULZ (1989) erkennen an Buche einen signifikanten Einfluss der Rohdichte auf die Biegefestigkeit und Biege-E-Modul: „das bekannte Verhältnis zwischen Rohdichte und Holzfestigkeit fand sich [bei ihnen] in allen Fällen bestätigt“.

2.7 Dichteabhängige Merkmalsausprägungen (CT)

Innovative Entwicklungen und technische Fortschritte haben in der Computertomographie in den letzten 30 Jahren zu verschiedenen Generationen von Geräten geführt. Eine ausführliche Geschichte der Computertomographie beschreibt KALENDER (2000).

Seit den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurden leistungsstarke Fächerstrahltomographen entwickelt, die zu Beginn dieses Jahrhunderts in die Entwicklung von Kegelstrahltomographen gipfelten. Kegelstrahltomographen erlauben Volumenaufnahmen von Gegenständen in sehr kurzer Zeit (wenige Sekunden) mit einer einzigen Rotation des Untersuchungskörpers oder der Aufnahmeeinheit. Durch diese Innovation wurde wieder das Interesse, die Computertomographie außerhalb ihres klassischen Einsatzgebietes der Medizin einzusetzen, geweckt. Die sehr hohe Auflösung der Aufnahmegерäte und die parallele Entwicklung in der EDV-unterstützten Auswertung und Analyse der CT-Aufnahmen bilden die Grundlage für neue Forschungsfelder. Der Einsatz der CT als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode zur Erfassung und Analyse der Rundholzqualität wurde schon zu Holzfeuchtenmessungen, Erfassung von Fäule, des fakultativen Rotkerns, der Jahrringstruktur, Ästen an Fichtenbrettern oder zum Methodenvergleich zur Dichtebestimmung erfolgreich untersucht (WIEBE, 1992; KÖLBL, 1994; KAPPENBERG, 1994; NIEMZ ET AL., 1997; SAUTTER, 2000).

In dieser Arbeit basieren einige Ergebnisse auf der Diplomarbeit von NÄHER (2002), die im Rahmen dieser Untersuchung angefertigt wurde.

Die Bedeutung der Dichte des Holzkörpers und deren Wechselwirkung mit anderen Rundholzqualitätsparametern ist oft Gegenstand holzkundlicher Untersuchun-

gen gewesen (s. 2.1.3). Es lag daher nahe, eine zerstörungsfreie Methode anzuwenden, die auf der Dichte des zu untersuchenden Materials und deren unterschiedliche Ausprägung im Holzkörper basiert und diese sehr hochauflösend in kleinsten Einheiten erfasst.

Einige Besonderheiten im Holzkörper, die auf eine erhöhte oder abweichende Dichte zurückgeführt werden, sind nur mit Einsatz der Computertomographie zu erkennen, (z. B. parabelförmige Dichtestränge, die vom Ast ausgehen und bis zur Rinde reichen, s. 4.8.4), da sie visuell oder licht-mikroskopisch nicht auszumachen sind.

2.8 Physikalische Kenngrößen der Baumarten Fichte und Buche

Physikalische Kenngrößen der Baumarten Fichte und Buche gekürzt aus Grosser und Zimmer, 1998.

	Fichte (Nadelholz)	Buche (Laubholz)
Botanischer Name	<i>Picea abies</i> (L.) Karst	<i>Fagus sylvatica</i> L.
Physikalische und mechanisch-technologische Kennwerte (Mittelwerte) bei einer U = 12%		
Rohdichte (im Bereich $r_{12} - r_{15}$) in g/cm ³		
Mittelwerte	0,47	0,68 (0,72)
Grenzwerte	0,33 – 0,68	0,54 – 0,91
Raumdichte (R) in kg / m ³		
Mittelwerte	403	578 - 584
Grenzwerte	n.a.	n.a.
Mittlere Festigkeitswerte („Bruchfestigkeiten“) in N / mm²		
Zugfestigkeit nach DIN 68 364		
Mittelwerte II	80	135
Druckfestigkeit nach DIN 68 364		
Mittelwerte	40	60
Biegefestigkeit nach DIN 68 364		
Mittelwerte	68	120
Mittlere elastische Eigenschaftswerte in N / mm² - Elastizitätsmoduln DIN 68 364		
E longitudinal	10 000	14 000
E radial	800	2 280
E tangential	450	1 160

2.9 Forstliche Aspekte

Fichte (*Picea abies* (L.) Karst)

Natürliches Areal

- von Mitteleuropa weit ins kontinentale Asien bis nach Sachalin. Mit Birke und Kiefer bildet sie die nördlichsten Wälder Skandinaviens und Sibiriens. Sie kommt bis zu 2 200 m ü. NN im Wallis vor (kollin – montan). Das Optimum der Art liegt in niederschlagsreichen Gebirgslagen (Alpenvorland, Bayer. / Böhmischer Wald, Karpaten).

Die Fichte ist als wichtigste Wirtschaftsbaumart weit über ihr natürliches Areal hinaus verbreitet. Allerdings zeigt sie sich vor allem in Reinbeständen als sehr anfällig für abiotische und biotische Schädigungen. Im Süddeutschen Raum ist sie vor allem durch Massenvermehrungen von Insekten sowie durch Windwurf stark bedroht, da sie bei schlecht durchwurzelbaren Böden zur Bildung von flachen Tellerwurzeln neigt. Besonders kritisch sind hierfür staunasse Böden. Rindenverletzungen führen bei der Fichte häufig zu Stammfäulen.

Das Holz der Fichte wird am vielseitigsten verwendet. Momentan macht sie den größten Anteil im Bauholzbereich aus und ist in Europa der wichtigste Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie sowie für die Produktion von Zellstoff und Papier.

Nach Ergebnissen der Bundeswaldinventur II 2004 nimmt die Fichte eine Gesamtfläche von 2,977 Mio [ha] des Wirtschaftswaldes der Bundesrepublik Deutschland ein (BMVEL 2004). Ihre Fläche hat zu den Ergebnissen der ersten Bundeswaldinventur um ca. 3,3% abgenommen. Der Holzvorrat der Fichte liegt bundesweit bei 1,231 Mrd [m³], das entspricht 36,4% des gesamten Holzvorrates.

Buche (*Fagus sylvatica* L.)

Natürliches Areal:

- etwa vom 40. bis zum 60. Grad nördlicher Breite. Ihr Areal reicht in West-Ost-Richtung von Spanien bis nach Polen.

Nach Ergebnissen der zweiten Bundeswaldinventur 2004 beträgt ihr Anteil an der Gesamtfläche des Wirtschaftswaldes 1,562 Mio [ha]. Ihre Fläche hat im Vergleich zu den Ergebnissen der ersten Bundeswaldinventur um 1,9% zugenommen. In Zukunft ist im Rahmen der Umwandlung von Nadelholzreinbeständen in Mischbestände eine weitere Steigerung des Buchenanteils zu erwarten. Der Holzvorrat der Buche liegt bundesweit bei 583 Mio [m³], was ca. 17,3% des gesamten Holzvorrates entspricht.

Die Rotbuche prägt fast alle natürlichen Waldgesellschaften Mitteleuropas bis hoch in die montane Stufe. Schattenverträglichkeit sowie mäßige Standortansprüche machen sie hier zur konkurrenzstärksten Baumart. Ein weiterer Faktor für ihre hohe Durchsetzungskraft ist ihre außerordentlich hohe Effizienz in der Erschließung des Kronenraumes. Durch ihre große Flexibilität eignet sie sich für unterschiedliche waldbauliche Konzepte. In früheren Zeiten wurden Buchenbestände meist niederdurchforstet. Daraus ergab sich jedoch ein einschichtiger und somit oft instabiler Bestandaufbau. In den letzten Jahrzehnten wurde mehr und mehr zur Hochdurchforstung und später zur Lichtwuchsdurchforstung nach SCHÄDELIN übergegangen. Durch die unterschiedlichen Erziehungsformen kann, trotz geringerer Stammzahlen, der gleiche Gesamtzuwachs erzielt werden, was die große waldbauliche Bandbreite der Buche widerspiegelt. „Bei kaum einer anderen Baumart gibt es derart diametral entgegengesetzte Möglichkeiten bezüglich Pflege und Erneuerung. [...]. Die Buche ist eine Baumart, die sowohl für eine Massenproduktion als auch zur Lieferung von Holzprodukten mit hoher Wertschöpfung geeignet ist“ (SCHÜTZ, 1998).

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsprogramm und Auswahlverfahren

Die untersuchten Probestämme wurden auf forstlichen Versuchsflächen ausgewählt, die vom Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München betreut werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Versuchsflächen; die in diese Untersuchung beprobt wurden

Versuchsfläche	Flächenkürzel	Forschungszweck	Anzahl Probestämme [N]
Denklingen	DEN 05	Fichtendurchforstungsversuch	4 Fi
Fabrik-schleichach	FAB 015	Buchendurchforstungsversuch	17 Bu
Freising	FRE 813	Erfassung u. Nachbildung der Wuchsdynamik in Fi-Bu-Mischbeständen	5 Fi
Höglwald	7	Bodenkundliche und Standortliche Forschung	5 Fi
Mitterteich	MIT 101	Buchenreinbestand	5 Bu
Schongau	SON 144/814	Erfassung u. Nachbildung der Wuchsdynamik in Fi-Bu-Mischbeständen	5 Bu, 13 Fi
Zwiesel	ZWI 134	Fichten-Buchen Mischbestand	2 Bu, 12 Fi
Zwiesel	ZWI 135	Fichten-Buchen Mischbestand	7 Bu, 4 Fi
Gesamt:	8 Versuchsflächen		36 Bu (auf fünf Versuchsflächen; 43 Fi (auf sechs Versuchsflächen)

3.2 Auswahl der Probebäume auf den Versuchsflächen und Aufnahmen am gefällten Probebaum

Die Probebäume wurden anhand folgender Kriterien ausgewählt:

- Alter > U/2 [halbe Umtriebszeit]
- Krafftsche Klasse 1 oder 2 (herrschend oder mitherrschend)
- keine äußerlich sichtbaren abiotischen oder biotischen Schäden (bsp. Wipfelbruch, Borkenkäfer, Pilzkrankungen etc)

Von dem gefällten Probebaum sind folgende Daten erhoben worden:

- Länge [m]
- Kronenansatzhöhe (2 Varianten: 1. grüner Ast im Quirl; 1. Quirl mit drei grünen Ästen) [m]
- Lage jedes Astquirls (Totast; Grünast) [m]
- Durchmesser aller Internodien [cm]
- Anzeichnen der Prüfkörper für die Erfassung der Rundholzqualität [S; F; Q]
- Dauerhafte Markierung einer geographischen Himmelsrichtung (meist Nord) am Stamm

Das Probenmaterial wurde im Bestand beschriftet und an den jeweiligen Waldwegen gelagert. Insgesamt sind **36** Buchen und **43** Fichten in diese Untersuchung eingegangen (siehe Tabelle 1).

Das verwendete Probenmaterial gliedert sich mengenmäßig wie folgt auf:

Tabelle 2: Anzahl Probenmaterial von den untersuchten Bäumen

Probenkörper	N / Fichte	N / Buche
Stammscheiben [S]	403	384
Astquirlle [Q]	129	75
F-Rundholzabschnitte [F]	129	71



Abbildungen 1 und 2: Teil des Probematerial der untersuchten Bäume in der Holzforschung München

3.3 Stichprobenkonzept zur Erfassung der Rundholzqualität an Fichte und Buche

Es wurde in Abhängigkeit der geplanten Untersuchungen eine Stichprobe in Anlehnung an KUCERA U. BARISKA (1982) entwickelt, die die Länge des Stammstücks, wie es in der Forstpraxis gehandelt wird, berücksichtigt. Es wurde in festgelegten Baumhöhen von 1.3 [m], 7 [m] und 14 [m] an der Fichte, sowie 1.3 [m], 5.3 [m] und bei ausreichender Länge des Rundholzstammstückes in 9.3 [m] an der Buche, drei direkt aneinander anschließende Abschnitte gewonnen.

Zuerst wurde eine Stammscheibe [S] (Abb. 3) mit der Dicke von ca. 10 [cm] herausgesägt. Daran anschließend wurde der Rundholzabschnitt mit dem nächsten Astquirl [Q] (Abb. 4) und schließlich das folgende Internodium [F] - Rundholzabschnitt (Astfreies Stück, Abb. 5) mit einer Mindestlänge von 50 [cm] herausgesägt.

Aus den Internodien der Baumhöhen 17.5 [m] – (z. T.) 35 [m] wurden in 2.5 [m]-Stufen noch zusätzliche Stammscheiben [S] gewonnen.



Abbildung 3: Stammscheiben [S];

Abbildung 4: Astquirl [Q]; Abbildung 5: [F]-Rundholzabschnitt.

3.4 Probenmaterial und Prüfkörper

Untersuchungsvorbereitungen

Auf der Oberseite der Prüfkörper wurden zuerst geographischen Himmelsrichtungen nach folgender Methode angezeichnet:

Ausgehend von der auf der Rinde des stehenden Baumes im Bestand angezeichneten geographische Himmelsrichtung (i. d. R. Nord) wurde über die Hirnseite durch die Markröhre eine Gerade gelegt. Der Punkt auf der gegenüberliegenden Seite des Prüfkörpers wurde als die komplementäre geographische Himmelsrichtung festgelegt. Im Rechten Winkel zu dieser Achse wurde eine Gerade durch die Markröhre gelegt, welche die beiden fehlenden Himmelsrichtungen markiert. Diese Methode hatte TRENDELENBURG schon 1937 angewendet. Allerdings können bei dieser Methode Abweichungen von den realen exakten geographischen Himmelsrichtungen auftreten. Dieses ist vor allem dann der Fall, wenn der Rundholzkörper eine starke Exzentrizität der Markröhre und oder eine abweichende Form vom konzentrischen Kreis aufweist. In dieser Untersuchung wurde allerdings aus messtechnischen Gründen an der Bezeichnung in Anlehnung an die geographischen Himmelsrichtungen festgehalten. Die Lokalisierung der gewonnenen Prüfkörper, ihr relativer gleicher Abstand zueinander im Rundholzkörper und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowie deren Reproduzierbarkeit konnte somit gewährleistet werden.

Das Probematerial wurde in der Schreinerwerkstatt der Holzforschung München (Abb. 6) für die anschließenden Untersuchungen vorbereitet.

Stammscheiben – [S]

In den Stammscheiben (Abb. 3) wurde entlang einer Nebenhimmelsrichtung (NNO) ein Entlastungsschnitt durchgeführt, um eine unregelmäßige Rissbildung im Prüfkörper während der Trocknungsphase zu verhindern.

Astquirl – [Q]

Die Äste in den untersuchten Astquirlen (Abb. 4) wurden nur bei der Fichte entlang ihrer Markröhre aufgesägt. Bei der Buche konnte dieses Prinzip nicht weiter ver-

folgt werden. Bei dieser Baumart wurden zerstörungsfreie Prüfmethode angewendet, um die innere Astigkeit des Rundholzkörpers zu bestimmen (s. 3.4.1).

Rundholzabschnitte – [F]

An den [F]-Rundholzabschnitten (Internodium, Abb. 5), die für die Ausformung von Biegeproben dienten, wurden entlang der angezeichneten Haupthimmelsrichtung ca. 5 [cm] breite Holzsplitter heraus gespalten (Abb. 6).



Abbildung 6: Holzsplitter für die Ausformung von fehlerfreien Biegeproben

Aus dem untersten Teil des Holzsplitter wurde ein ca. 1,5 [cm] breites Stück abgesägt, welches als ‚Schablone‘ bei der Ausformung des einzelnen Prüfkörpers diente. So konnte die exakte Lage der einzelnen Biegeprobe im Rundholzabschnitt festgehalten werden (Abb. 7 bis 11).



Abbildungen 7 - 8 - 9 -10: Schablonen für die Bestimmung der Lage der einzelnen Biegeprüfkörper im Rundholzabschnitt.



Abbildung 11: Ein Teil der ausgeformten fehlerfreien Biegeproben mit zwei Schablonen

Trocknung

Das Untersuchungsmaterial wurde im Umlufttrockner auf eine Holzfeuchte von $u = 12\%$ schonend getrocknet. Die Trocknungsdauer lag zwischen 43 bis 55 Tage.

Stammscheiben – [S]

Die getrockneten Stammscheiben wurden in mehreren Stufen mit einem Bandschleifer auf der Oberseite geschliffen. Die Körnungsgröße des Schleifpapiers steigerte sich von Schleifvorgang zu Schleifvorgang von 40er- bis zu 180er Stärke. Versuchsweise wurden einige Stammscheiben zusätzlich mit 320 und 560er Körnungsgröße geschliffen.

Äste / Astquirl – [Q]

Bei der Fichte wurde an den getrockneten Astquirlen jeder Ast entlang seiner Markröhre mit der Bandsäge aufgesägt. Insgesamt wurden 835 Äste (s. Tab. 3) untersucht.

Biegeproben – [F]

Aus den getrockneten Holzstücken ([F]-Stücke) wurden fehlerfreie Biegeproben nach DIN 52 186 herausgearbeitet. Diese wurden in einem Klimaraum bei 20° [C] und 65% [U] auf eine Holzfeuchte von $u = 12\%$ konditioniert.

Aus dem Probematerial, welches im Wald von den Bäumen gewonnen wurde, ergab sich nach dem Trocknen folgende Anzahl von Prüfkörpern als Grundlage für die durchgeführten Untersuchungen:

Tabelle 3: Anzahl Prüfkörper für die einzelnen Untersuchungen

	N / Fichte	N / Buche
Biegeprüfung	2120	1391
Rohdichte radial	1447	./.
Im Holzkörper liegende Äste	828	./.
Chinesenbärte, Mondkrater	./.	1446
Reaktionsholz	403	./.
Jahringmessung	403	335

3.5 Untersuchte Kenngrößen

Folgende Kenngrößen sind in diesem Projekt holzkundlich untersucht worden:

- Innere Astigkeit
- Reaktionsholz (Fichte)
- Rohdichte [ρ_{12}] nach DIN 52 182 (Fichte)
- Biege-Festigkeit; Biege-E-Modul; tangentielle Rohdichte nach DIN 52 186 (beide Baumarten)

3.5.1 Innere Astigkeit

Fichte

An den Rundholzabschnitten [Q], die den nächstgelegenen Astquirl im ganzen enthielten und die unterhalb der [F]-Stücke im Stamm anschlossen, wurde die innere Astigkeit wie folgt untersucht:

Die Äste wurden bei der Baumart Fichte entlang ihrer Markröhre aufgesägt. Die Aststummel waren äußerlich erkennbar. An dem sich ergebenden Astbild im Holzkörper wurden folgende Strecken gemessen (s. Abb. 12):

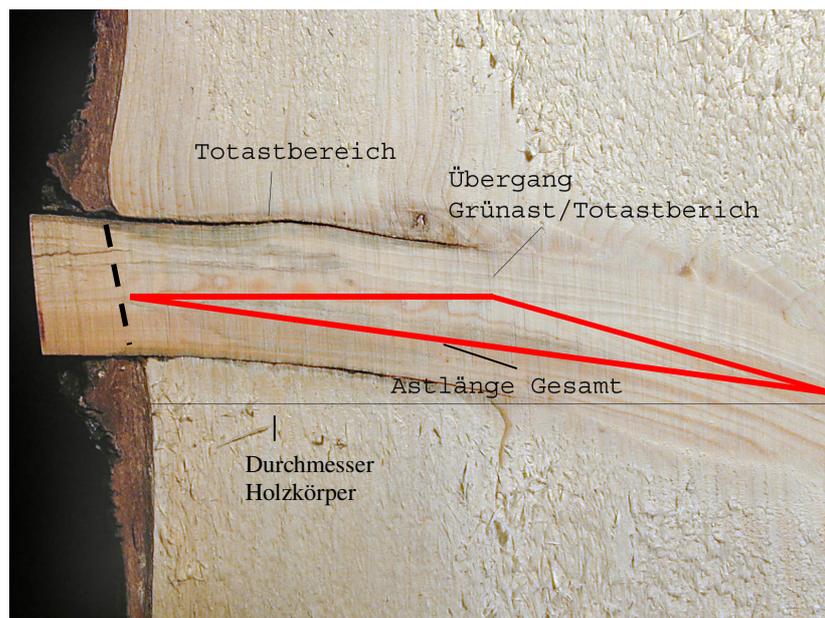


Abbildung 12: Fichte: Astbild mit Messgrößen für die Erfassung der inneren Astigkeit.

Definitionen für die Bestimmung der Inneren Astigkeit:

Grünast: Astteil, der mit dem Holzkörper fest verwachsen ist.

Totast: Astteil, der mit dem ihn umgebenden Holzkörper nicht mehr fest verwachsen ist.

Gesamtlänge des Astes: die Strecke, die zwischen Astursprung (Markröhre Stamm und Markröhre Ast) und Markröhre Ast beim Austritt aus dem Holzkörper liegt.

maximale Astbreite: der Übergang vom Grünast zum Totast im Holzkörper.

Buche

Bei der Baumart Buche konnte diese Methode zur Erfassung der Inneren Astigkeit nicht angewendet werden. Die visuelle Ansprache der im Holzkörper liegenden Äste ist zwar möglich, allerdings ist ein Aufsägen entlang der Astmarkröhre z. T. aufgrund der zu geringen Astdimension ausgeschlossen. Da sich die Äste z.T nicht direkt in Rindennähe befanden, war die Bearbeitung mit der Bandsäge nicht effektiv. Selbst das Anwenden eines mehrstufigen Einschnittverfahrens, bei dem der Rundholzkörper in mehrere hintereinander gereihte, rechteckige Körper unterteilt wurde, brachte nur unbefriedigende Ergebnisse beim ‚Aufspüren‘ der Äste. Aus diesem Grunde wurde der Einsatz von zerstörungsfreien Prüfmethoden für die Erfassung der Inneren Astigkeit als auch anderer Holzqualitätsparameter an der Buche untersucht. Der Einsatz von Computer-Tomographen mit unterschiedlichen Auflösungsvermögen erschien hier als sehr geeignete Methode (s. 3.6), diese Anforderungen an die Fragestellung zu erfüllen.

3.5.2 Reaktionsholz (Fichte)

Für die Bestimmung von dem Reaktionsholz an Fichte wurde ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe die flächenbezogene Ausdehnung im Querschnitt untersucht werden konnte. Eine Kreisschablone mit einem Durchmesser von 70 [cm], die in 24 Segmente mit einem Öffnungswinkel von jeweils 15° [Altgrad] unterteilt ist, diente zur Flächenbestimmung. Die Beschriftung der Segmente fand in Anlehnung an das analoge Zifferblatt einer Uhr statt (von 0 bis 11,5 Uhr). Zusätzlich ist

die Schablone in 27 konzentrische ‚Innenkreise‘ unterteilt, die jeweils im Abstand von 1,25 [cm] angeordnet sind. (*Ausnahme bildet der zentrale, erste Innenkreis, der einen Durchmesser von 5,0 [cm] hat, um mit den Segmentgrenzen eine ausreichend große Zone zu bilden.*) Die Zonen haben von innen nach außen unterschiedliche, zunehmende Flächengrößen von 0.82 [cm²] (Zone 1 = innerster Ring) bis 11.25 [cm²] (Zone 27 = äußerster Ring). Für die Schätzung des Anteils von Reaktionsholz im einzelnen Segment wurde die Kreisschablone auf die Stammscheibe mit ihrem Mittelpunkt auf die Markröhre und der 0 (12) Uhr-Linie auf die Nordrichtung gelegt. Für jede einzelne Zone der Kreisschablone wurde visuell der prozentuale Flächenanteil an Reaktionsholz in den Stufen 1 (= bis 50%) oder 2 (= über 50%; per Definiton=100%) geschätzt. Das Schätzen wurde mittels punktierter, konzentrischer Zwischenkreise auf der Schablone durchgeführt, die die jeweilige Schätzstufe markieren.

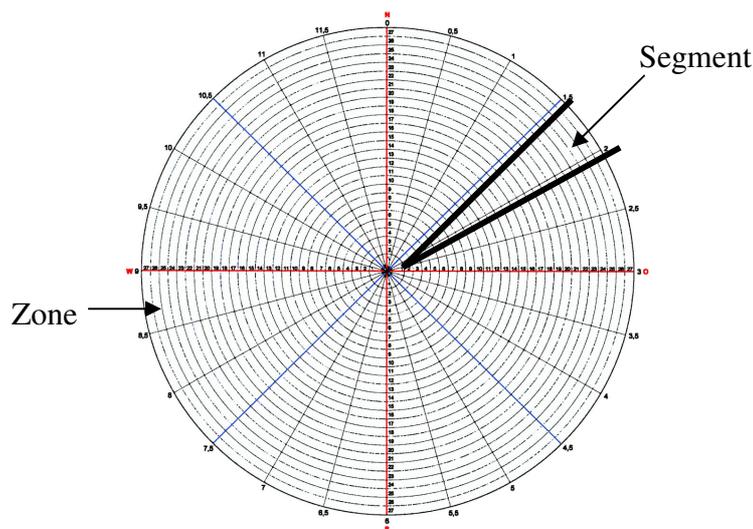


Abbildung 13: Kreisschablone, 70 [cm]

Makroskopisch betrachtet, fällt das Reaktionsholz durch seine dunklere, rötlich-braune Färbung in den einzelnen Jahrringen auf.

3.5.3 Rohdichte [Rho12] nach DIN 52 182 (radial)

Die Rohdichte nach DIN 52 182 wurde radial entlang der vier angezeichneten Haupthimmelsrichtungen bestimmt, an denen vorher exakt ihre radialen Jahrringbreiten gemessen wurden.

Es wurden Probekörper mit den Ausmaßen 20 x 20 x 40 [mm] ausgeformt. Die Ausformung begann ausgehend von der Rinde in 4 [cm] Abständen in Richtung Markröhre, bis kein Prüfkörper mit den entsprechenden Maßen mehr gewonnen werden konnte. Durch diese Vorgehensweise resultieren Prüfkörper, die nicht bei einem gleichen Alter beginnen. Das Alter des ersten Jahrrings des Prüfkörpers, der der Markröhre am nächsten liegt, kann somit zwischen 3 bis 25 Jahre variieren.

Eine andere Möglichkeit der Ausformung der Prüfkörper war aufgrund der mehrmaligen Verwendung des Probematerials für die verschiedenen, zeitlich nacheinander durchgeführten Untersuchungen nicht möglich. In dieser Arbeit werden für die radialen Rohdichteuntersuchungen die Fichten aus dem Bayerischen Nationalpark Zwiesel verwendet. Aus zeitlich limitierenden Gründen konnten die Probebäume der anderen Versuchsflächen nicht untersucht werden. Es wurde die Fichten der Versuchsflächen in Zwiesel ausgewählt, um Aussagen der Rohdichtevervariation innerhalb eines Baumkollektivs und eines Standortes zu untersuchen.

Konditionierung der Prüfkörper

Die fertigen Prüfkörper wurden in einem Klimaraum bei Normalklima nach DIN 50 014, d. h. 20° [C] und relative Luftfeuchte von 65 [%] konditioniert. Durch seine hygroskopischen Eigenschaften unterliegt Holz großen Feuchtigkeitsschwankungen. Es ändert dadurch seine Masse und wenn der Feuchtigkeitsgehalt unterhalb des Fasersättigungsbereiches liegt, auch sein Volumen.

Die anschließende Bestimmung der Rohdichte [rho12] wurde mittels eines Auftriebsverfahrens nach ARCHIMEDES durchgeführt.

Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Rohdichte und Jahrringbreite

Der Zusammenhang zwischen Jahrringbreite und Rohdichte wurde mit Hilfe der Jahrringmessung (s. 3.5.5) untersucht. Da fixe Prüfkörperabmessungen (s. o.) vorlagen, wurde mit Hilfe eines Excel-Makros die reale Anzahl von Jahrringen pro Prüfkörper bestimmt. So konnte bei der Auswertung von der Anzahl Jahrringe im Prüfkörper auf die durchschnittliche Jahrringbreite geschlossen werden.

3.5.4 DIN 52 186: [Biege-] Festigkeit [N/mm²], E-Modul [N/mm²], Rohdichte [rho12] (tangential)

Die Biegefestigkeit [N/mm²], der E-Modul [N/mm²], die Rohdichte [rho12] in tangentialer Richtung wurde nach DIN 52 186 an fehlerfreien Biegeproben untersucht. Die Proben wurden aus den [F]-Rundholzabschnitten mit den Längen von 50 [cm] entlang der angezeichneten Radien der vier Haupthimmelsrichtungen ausgeformt. Die Lage der einzelnen Biegeprobe wurde bei der Ausformung auf einer ‚Schablone‘, die vom untersten Teil des Rundholzabschnittes abgesägt wurde, festgehalten. Die Biegeprüfung wurde an der Instron-Prüfmaschine der Holzfor- schung München durchgeführt.

Als physikalische Kenngrößen für die Beschreibung der Holzeigenschaften wurde die Biegefestigkeit, der E-Modul sowie die (tangentiale) Rohdichte [rho12] bestimmt.

Biegefestigkeit

Definition: Die Biegefestigkeit ist die bis zum Bruch der Probe auftretende größte rechnerische Biegespannung.

Biege-E-Modul

Definition: Der Biege-E-Modul ist die theoretisch benötigte Spannung, um einen Probekörper in seiner Länge zu verdoppeln. Er ist eine Kenngröße für die Verformungssteifigkeit der Probe im elastischen Bereich. Er wird aus der elastischen Durchbiegung der Probe bestimmt. Er errechnet sich aus dem ermittelten Daten-

satz der Biegeprüfung anhand des bei der Prüfung für jede Probe erstellten Kraft-Durchbiegungs-Diagramms bis zu etwa einem Drittel der aufgetragenen Höchstkraft der einzelnen Prüfung.

Rohdichte tangential

Die tangentielle Rohdichte wurde aus der Masse und dem berechneten Volumen bestimmt.

Insgesamt sind von der Fichte **2120** und von der Buche **1391** fehlerfreie Biegeproben in diese Untersuchung eingegangen.

Es wurde untersucht, ob die Rohdichte einen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften und den Biege-E-Modul von Holz hat, wie es in der Literatur angegeben wird (GRAMMEL 1990, ZHANG 1997). Nach BERNHART (1964) hängt die Variation der Festigkeit innerhalb eines einzelnen Stammes wesentlich von seiner Rohdichtevariation ab, ist aber stets größer als diese. „Das Verhältnis zwischen Rohdichte und Festigkeit ist sowohl innerhalb eines Standortes oder einer Herkunft als auch zwischen Standorten und Herkünften sehr unterschiedlich. Auf gleichen Standorten treten merkliche relative Festigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Stämmen [Fichte] auf“ (BERNHART, 1964).

3.5.5 Messung der radialen Jahrringbreiten

Die Erfassung der radialen Jahrringbreiten wurde an einem Messtisch mit der modifizierten Jahrringmessanlage nach JOHANN (Holzforschung München) durchgeführt (Abb. 14).



Abbildung 14: Jahrringmessanlage Holzforschung München

Die Messanlage besteht aus einer mechanischen und einer optischen Komponente, einer digitalen Messschiene der Firma MITUTOYO und einem Add-Inn Makro der Firma Hoffmann für das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel (Version 97). Der mechanische Teil dient zur präzisen, manuellen Bewegung der optischen Messeinrichtung über dem Objekt entlang von x-y Koordinaten in horizontaler Projektionsebene.

Der optische Teil besteht aus einem Auflichtmikroskop mit den Vergrößerungen 2,0x; 6,3x und 10x-fach. An das Auflichtmikroskop ist eine Kamera angeschlossen, die das vergrößerte Bild auf einen Bildschirm überträgt. Auf dem Bildschirm befindet sich eine Linie, die als Marke zur Messung dient.

Die digitale Messschiene greift die Messstrecke ab und überträgt mit Hilfe eines Schalters und des Add-Inn Makros den Messwert in das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel. Für die Übertragung des Messwertes wird der Schalter manuell oder mit dem Fuß betätigt.

Die Messung des einzelnen Radius begann in der Markröhre und lief entlang einer angezeichneten Linie (= Himmelsrichtung) bis zum letzten gebildeten Jahrring des Prüfkörpers.

Die Berechnung der Radialbreiten und die Zuordnung des zugehörigen Jahres erfolgte ausgehend vom letzten Messwert des Datensatzes (= Jahr der Fällung des Baumes), von z. T. noch nicht vollständig gebildeten Jahrringen mit hohen Frühholzanteilen oder noch komplett fehlendem Spätholz.

Datenerfassung und Auswertung

Für die Erfassung und Auswertung der gemessenen Daten wurden das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel (Version 2000) sowie das Statistikprogramm SPSS (Version 11.0) verwendet. Der Text wurde mit dem Textverarbeitungsprogramm Microsoft Word (Version 2000) erstellt.

3.6 Die Anwendung von CT-Verfahren zur hochauflösenden Erfassung und Darstellung von Rundholzqualitätsmerkmalen

Anmerkung: Die Computertomographie stellt ausschließlich errechnete, digitale Bilder diskreter Schichten zur Verfügung. Darin unterscheidet sich diese Methode deutlich von der konventionellen Röntgentechnik, mit der direkt gewonnene, analoge Bilder von ganzen Körperabschnitten überlagert auf einem Film abgebildet werden.

3.6.1 Kurzporträt der verwendeten Computertomographen

Somatom AR.HP

Die Aufnahmen im Klinikum Rechts der Isar der TU-München sind in der Abteilung „Strahlentherapie“ durchgeführt worden. Als Tomograph ist ein Somatom AR.HP der Firma Siemens verwendet worden, der nach dem Fächerstrahlprinzip arbeitet und Objekte bis zu einem Durchmesser von 44 [cm] vollständig untersuchen kann. Die er-

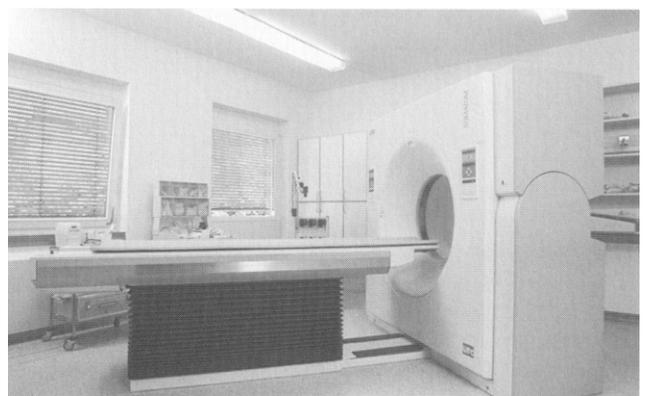


Abbildung 15: Somatom-Tomograph (nach KALENDER 2000)

rechnete Matrix besteht aus $512 * 512$ Bildpunkten, was einer Pixellänge von 860 [μm] entspricht. Durchgeführt wurden die Aufnahmen mit einer Röhrenspannung von 130 [keV], da sich in Vorversuchen an Fichtenproben gezeigt hat, dass bei lufttrockenem Holz diese Energie ausreichend ist.

Um die Aufnahmezeiten nicht unnötig in die Länge zu ziehen, sind die zu untersuchenden Bereiche, wie die Positionen von Ästen und Verletzungen, durch optische Ansprache vorher festgelegt worden, auch wenn diese Methode zur genauen Lokalisierung ungeeignet ist. Aus demselben Grund sind die Proben in Längsrichtung nicht durchgehend in ihrer gesamten Länge aufgenommen, sondern in einzelnen Scans im Abstand von 3 [mm] bzw. 5 [mm] durchgeführt worden.

Kegelstrahltomograph

Im Werk Untertürkheim der Daimler-Chrysler AG sind Aufnahmen an einem Kegelstrahltomographen möglich gewesen. Verwendet wird dieses Gerät in der Produktions- und Werkstofftechnik im Bereich physikalische Prüfverfahren zur Fehler- und Dimensionsprüfung. Als Strahlenquelle wird eine Röntgenröhre verwendet, damit die Energie der Quanten an die zu untersuchenden Materialien optimal angepasst werden kann. Zum Auffangen der Strahlung dient ein 40 [cm] * 40 [cm] großer Flächendetektor, der in jeder Zeile 1024 quadratische Aufnahmeeinheiten besitzt. Durch die Geometrie der Untersuchungsanordnung von Strahlenquelle, Probe und Detektor ergibt sich eine Vergrößerung des Objektes um den Faktor 1,2. Aus diesem Grund entspricht die Pixellänge von 390 [μm] einer tatsächlichen Kantenlänge des untersuchten Voxels von 325 [μm]. Pro Rotation eines Probekörpers um 360° werden 1400 einzelne Scans durchgeführt, um eine möglichst hohe Bildqualität zu erlangen.

Anders als bei medizinischen Geräten dreht sich bei dieser Anlage das Untersuchungsobjekt, während Röntgenröhre und Detektoren stationär im Strahlenschutzgehäuse montiert sind. Dieser Schutzbau ist wegen der harten Strahlung notwendig, die zur Durchdringung von Metallen verwendet werden muss. Die reine Aufnahmezeit der gesamten Probe liegt bei ca. 40 Minuten, da die untersuchten Objekte, wie Motorblöcke, pro Aufnahme länger beleuchtet werden müssen, um den erforderlichen Kontrast zu erzielen, während bei Holz deutlich geringere Zeiten notwendig sind.

3.6.2 Rekonstruktion der gemessenen Daten

Für den Datentransport vom Kegelstrahltomographen zum Rechner, in dem die Bilder rekonstruiert werden, und von dort zurück an einen Rechner zur Visualisierung, benötigt die Anlage jeweils weitere 30 Minuten. Und selbst die reine Rechenzeit beträgt trotz 64 Prozessoren noch ca. 45 Minuten, so dass von Beginn der Aufnahme bis zum Erscheinen des rekonstruierten Bildes ungefähr zwei Stunden vergehen.

3.6.3 Artefakte

In den Axialschnitten sind kreisförmige Artefakte zu erkennen, die zum Teil von Problemen bei der Rekonstruktion der Daten, aber vor allem i. d. R. von falschen Aufnahmen einzelner Detektoren herrühren. Diese Messeinheiten waren noch nicht richtig kalibriert und zeigen daher zu hohe oder zu niedrige Absorptionswerte an. Sie mussten im Laufe der Zeit noch nachjustiert werden. Durch die Drehung des Objektes um 360° entstehen so die konzentrischen Kreise. Wegen der anderen Betrachtungsebene und der Drehung des Objektes werden diese Fehlwerte im leicht gekippten Sagittal- und Frontalschnitt als nach außen geöffnete flache Ellipsen abgebildet. Im dreidimensionalen Bild ergeben sich daraus je nach Neigungswinkel mehr oder weniger abgeplattete Kreise.

3.6.4 Referenzkörper

Um für die Dichte des Holzes einen Orientierungswert zu haben, ist als Referenzkörper ein homogener Niederdruck-Polyethylenstab mit einer Dichte von $0,95 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ bei den Aufnahmen am 6. August 2001 im Klinikum Rechts der Isar verwendet worden. Die Buche besitzt eine Rohdichte im darrtrockenen Zustand im Mittel von $0,68 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, eine Variationsbreite von $0,49 \dots 0,88 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Sie besitzt eine Frischdichte von $0,82$ bis $1,27 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ mit einem Mittelwert von $1,07 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ (GROSSER U. ZIMMER, 1998). Da die Probekörper im Freien lagerten, ist ein Stab gewählt worden, dessen spezifisches Gewicht zwischen den Mittelwerten für feuchtes und trockenes Holz liegt.

3.6.5 Rindenbild

Zur Ansprache der horizontalen Lage der Merkmale im Probekörper wird deren Mitte in Anlehnung an das Ziffernblatt analoger Uhren als ganze Stunde festgehalten. Der Bezugspunkt dieser Position ist die Nordlinie als 0 Uhr. Als vertikaler Fixpunkt dient die Mitte des oberen Rands des Merkmals und die dazugehörige Höhe über dem unteren Hirnschnitt. Zusätzlich sind bei Siegeln von Chinesenbärten, Warzen und Mondkratern die maximale horizontale und vertikale Erstreckung, sowie, ebenfalls bei den Winkelnarben, die Barthöhe und –breite gemessen worden.

3.6.6 Äste

Angewandt wurde diese Methode in erster Linie um die Erfassung und Vermessung der inneren Astigkeit zu testen. Es ist geprüft worden, ob das verwendete Messschema der Fichte auch für die CT-Aufnahmen an der Buche anwendbar ist. Als Parameter sind dabei die Lage und der Winkel des Astbeginns zur Markröhre sowie Länge und Winkel des Grün- und Totastes erhoben worden. Somit können Vergleiche zu den bestehenden Formeln für die Schätzung der Ausformung und Dicke des astfreien Mantels durchgeführt werden.

Für die Vermessung haben sich die Sagittalschnitte (s. Abb. 102) angeboten, das heißt die in y-z-Richtung eines Koordinatensystems verlaufenden Ebenen. Als Basis für die Winkel dient eine zur Rindenoberfläche parallele Linie, die im Bereich des Stammzentrums verläuft. Diese Hilfslinie ist notwendig, da beim Aufspalten die Markröhre durch Unregelmäßigkeiten im Holzaufbau, hauptsächlich verursacht durch die Faserabweichung im Astbereich, nicht immer exakt getroffen oder sogar vom untersuchten Probekörper abgetrennt wurde.

Der Grünast entsteht am Schnittpunkt mit der Markröhre und endet, wenn im Randbereich des Astes der Kontakt mit dem umgebenden Holzkörper verloren geht. Als Endpunkt der Längenmessung wird die Mitte zwischen den gegenüberliegenden Kontaktstellen gewählt. Direkt anschließend beginnt der Totast und reicht bis zur Mitte der Verbindungslinie zwischen den äußersten Bereichen des Hohlraumes, bevor sich der homogene Holzkörper anschließt.

3.6.7 Mondkrater

Bei den Mondkratern wurde die Art ihrer Darstellung in den CT-Aufnahmen und das Verhältnis der Ausdehnungen des Rindenbildes zu der dazugehörigen Verletzung untersucht.

Um die Abmessungen der Äste und der Mondkrater anhand des Bildes wirklichsgetreu abgreifen zu können, muss die CT-Aufnahme kalibriert werden. Da bei den Bildern die Zahl der gemessenen Bildpunkte auf dem Monitor aufgerufen werden kann, ist diese Anzahl durch Multiplikation mit der Länge der Detektoreinheit angepasst worden. So betrug der Faktor für die am Somatom AR.HP durchgeführten Aufnahmen 860 [μm] und bei den Bildern am Kegelstrahltomographen 325 [μm].

Die eingezeichneten Linien wurden, wie bei den Astaufnahmen, zur Erleichterung der Vermessung mit dem Programm „Adobe Photoshop 6.0“ der Firma Adobe Systems Incorporated erstellt, unkomprimiert abgespeichert und anschließend mit „Scion Image 3b“ der Firma Scion Corporation vermessen.

3.6.8 Rotkern

Ein Ziel im Rahmen der Auswertung ist, die Deckung der durch CT aufgenommenen Rotkerngrenzen mit der tatsächlichen Grenze des Kerns zu vergleichen. Bei den untersuchten Farbkernen handelt es sich in dieser Arbeit ausschließlich um Wolkenkerne nach der Klassifizierung von SACHSSE (1991). Da eine mathematische Vermessung und Vergleich nur eine Gegenüberstellung der rechnerischen Größe zulässt, ohne die örtliche Erstreckung des Kerns zu beurteilen, ist die Deckung der Grenzen direkt optisch von NÄHER (2002) kontrolliert worden.

3.6.9 Weitere Untersuchungsansätze

Ein Ansatz bei der Betrachtung und Auswertung der Bilder war, welche Holzmerkmale der Buche mit einer hochauflösenden CT-Anlage zusätzlich zu den bisher bekannten, erfasst und beschreibbar sind. Als Beispiel seien die von HABERMEHL und RIDDER (1993) mit einem mobilen CT-Gerät durchgeführten Analysen von Bäumen auf Fäulen erwähnt. Weiter wurde untersucht, welche Aussagen sich über die Verläufe der Jahrringe treffen lassen, die bereits an der Fichte untersucht und als gut erkennbar beschrieben worden sind.

Zum Schluss sind die Bilder auf Unregelmäßigkeiten in der Dichteverteilung untersucht worden, um deren Verlauf in der zwei- und dreidimensionalen Darstellung nachvollziehen zu können. Solche Unregelmäßigkeiten wurden zum Beispiel von LANGENKAMP (1931, zit. n. KOLLMANN 1936) oder WOBST (1967) erwähnt.

Tabelle 4: Prüfkörper, die mit CT-Anlagen untersucht wurden:

Spiral-CT-Gerät / Daimler Chrysler AG in Untertürkheim	Siemens Somatom / Strahlentherapie des Klinikums Rechts der Isar der Techni- schen Universität München
BU57_4T BU297_6T BU166_6T	BU12_6T BU13_6T BU110_6T BU110b_6T BU300_4T BU900_6T BU1500b_4T BUc2100_6T Buc2100_6T BU428_6T

Die Rundholzabschnitte, welche in Tabelle 4 wiedergegeben sind wurden für den Einsatz von CT-Anlagen ausgewählt, da äußerlich an ihrem Rindenbild sichtbar war, dass sie entweder eingewachsene Äste (Chinesenbärte), innere Verletzungen (Mondkrater) oder Rotkern (am Hirnschnitt), etc aufweisen.

3.6.10 Verwendete Software

Die Bearbeitung und Auswertung der Aufnahmen erfolgte mit Hilfe der Softwareprogramme VGStudio 1.0 der Firma Volume Graphics sowie Transform 3.3.0 der Firma Fortner Ltd. Mit dem Software-Programm Transform 3.3.0 wurden entlang einer Messachse Dichteprofile erstellt und für die Erkennung von Qualitätsmerkmalsausprägungen ausgewertet (s. u.).

Mit dem Softwareprogramm Volume Graphics 1.0 wurden z. T. die Aufnahmen der Prüfkörper gedreht, damit bestimmte Qualitätsmerkmale, wie z. B. im Holzkörper

liegende Äste, Rotkern, etc. besser dargestellt und präzise lokalisiert werden konnten.

Für die Darstellung von computertomographischen Aufnahmen sind drei Schnittebenen möglich:

- **Axial** [X-Y-Ebene eines Koordinatensystems]
- **Sagittal** [Y-Z-Ebene eines Koordinatensystems]. Der Radialschnitt verläuft durch das Mark des Probekörpers und ist somit eine Sondervariante des Sagittalschnittes.
- **Frontal** [X-Z-Ebene eines Koordinatensystems]

3.6.11 Spezielle Anwendungen der Software ‚VGStudio 1.0‘ der Firma Volume Graphics

Der ‚Gaußfilter‘ des Softwareprogramms VGStudio 1.0 der Firma Volume Graphics glättet in Abhängigkeit seiner Einstellung den Datensatz, welcher in den Abbildungen dargestellt wird. In der Darstellung der gefilterten Datensätze fehlen diese Bereiche. Bei einer höheren Dichte des Qualitätsmerkmals zu dem umgebenden Rundholzkörper werden die Qualitätsmerkmale veranschaulicht und lassen ihre Lokalisierung und Darstellung ohne Zerstörung des Prüfkörpers zu (z. B. Äste). Die folgenden Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe dieser Methode verschiedene Qualitätsmerkmale lokalisiert werden können, die einem bestimmten Dichtebereich entsprechen.

Gradientenfilter

Das Softwareprogramm VGStudio 1.0 der Firma Volume Graphics enthält die Möglichkeit, mit Hilfe eines Gradientenfilter bei der Darstellung von CT-Bildern, die Bereiche im Untersuchungsobjekt zu veranschaulichen, die die höchsten Gradienten in den Dichtewerten der benachbarten Voxel aufweisen. Mit dieser Methode werden beim Rundholzkörper z. B. Risse sehr gut dargestellt oder Bereiche mit den höchsten Dichteunterschieden im Holz.

Dichteprofile

Die in dieser Arbeit verwendeten Dichteprofile sind mit dem VGStudioMax1.0 erstellt worden. Es besteht die Möglichkeit in einen Axialschnitt eine frei gewählte Linie hineinzulegen. Das Dichteprofil, welches entlang dieser Messachse erstellt wird, enthält die Anzahl der Pixel als Abszisse und die relativen Absorptionswerte als Ordinate. Die Ordinatenkalibrierung ist abhängig von dem Dichtebereich, in dem die Messachse liegt. Auf diesen Bereich werden die 256 möglichen Grauwerte aufgeteilt. Die Kurven der Dichteprofile sind für sich alleine betrachtet sehr schwierig und nur mit sehr großen Unsicherheiten auf ihre Aussagen zu interpretieren. Die an den beiden CT-Geräten gemessenen Hounsfield-Units wurden mit dem Programm ‚Transform 3.3.0 PPC‘ ermittelt. Anhand der Festlegung einer sogenannten Region of Interest [RoI] war der dargestellte Bereich des Datensatzes farblich markiert und konnte so als Grundlage für weitere Berechnungen verwendet werden.

Bei der kombinierten Verwendung des Dichteprofiles und der zugehörigen Abbildung können die einzelnen Peaks der Kurve den Merkmalen entlang der Messachse im Holzkörper eindeutiger zugewiesen werden. Dadurch können die Dichtewerte sowohl graphisch als auch in Zahlen ausgedrückt werden. Absorptionswerte für bestimmte Rundholzmerkmale können ermittelt und zugeordnet werden. Um sichere Aussagen zu ermöglichen, müssen allerdings noch Eichkurven für die verschiedensten Zustände des Holzkörpers (Feuchtegehalt, physiolog. Zustand) erstellt werden.

4 Ergebnisse

4.1 Innere Astigkeit Fichte

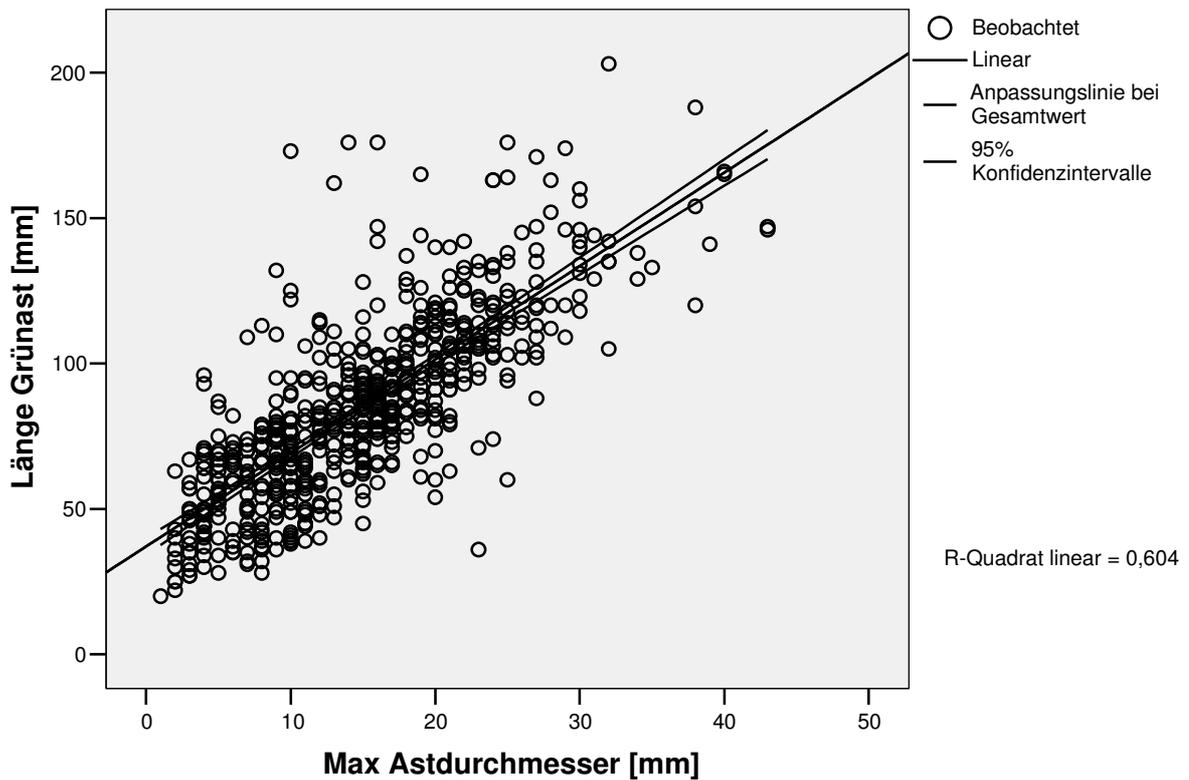


Abbildung 16: alle untersuchten Fichten - Streudiagramm von Länge Grünast [mm] über maximalen Astdurchmesser [mm].

Tabelle 5: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 16 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Max Astdurchmesser [mm]	3,213	0,104	0,777	0,000
(Konstante)	37,096	1,746		0,000

In Abb. 16 wird der Zusammenhang zwischen dem maximalen Astdurchmesser und der Länge des grünen Astes im Rundholzkörper dokumentiert. Das Bestimmtheitsmaß von $[R^2] = 0.604$ unterscheidet sich signifikant von 0,00, das bedeutet, dass der Anteil der Varianz der Streuung der Werte ‚Länge Grünast‘ zu 60% von dem maximalen Astdurchmesser beeinflusst werden.

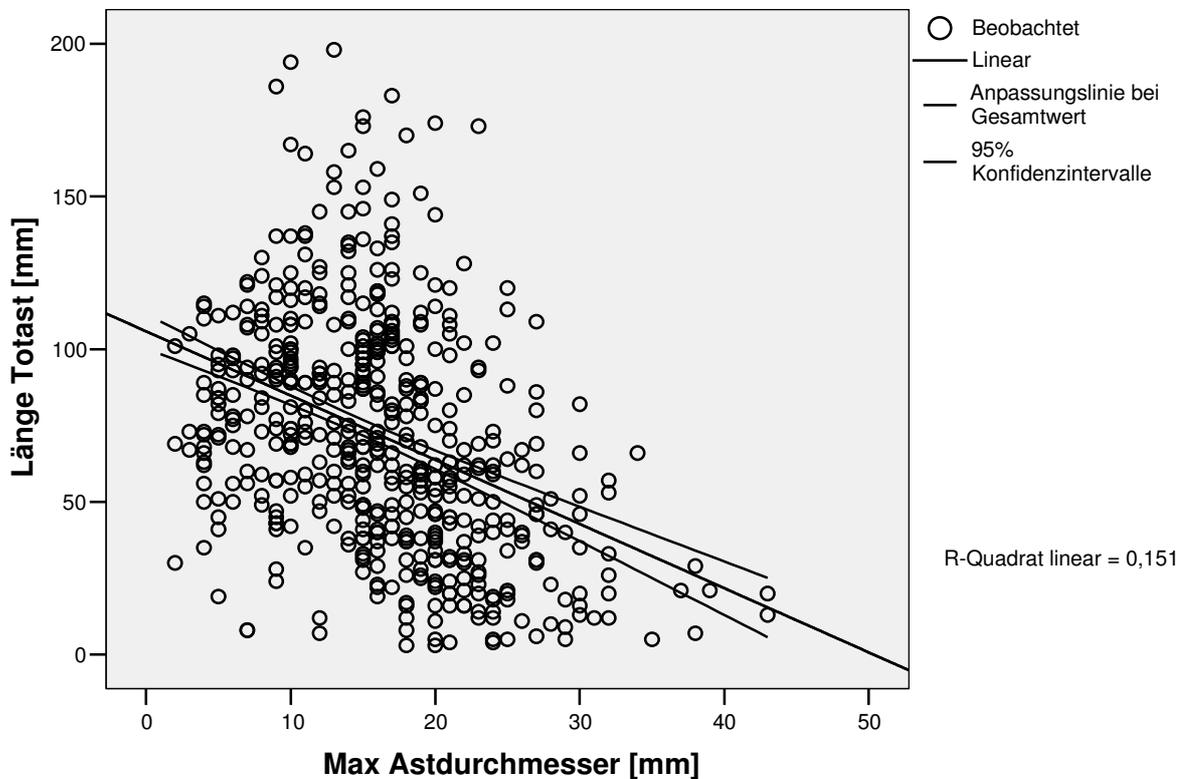


Abbildung 17: alle untersuchten Fichten - Streudiagramm von Länge Totast [mm] über dem maximalen Astdurchmesser [mm].

Tabelle 6: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 17 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Max Astdurchmesser [mm]	-2,102	0,218	-0,388	0,000
(Konstante)	105,827	3,858		0,000

In Abbildung 17 ist der Zusammenhang zwischen dem maximalen Astdurchmesser und der Länge des Totastes im Rundholzkörper dargestellt. Das sehr niedrige Bestimmtheitsmaß von $[R^2] = 0.1506$ unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der Werte ‚LängeTotast‘ nur zu 15 % von dem maximalen Astdurchmesser erklärt werden kann. Es besteht somit ein deutlich geringerer Einfluss der gemessenen Größen zueinander als bei den Ergebnissen der Auswertung von der Messgröße Grünast.

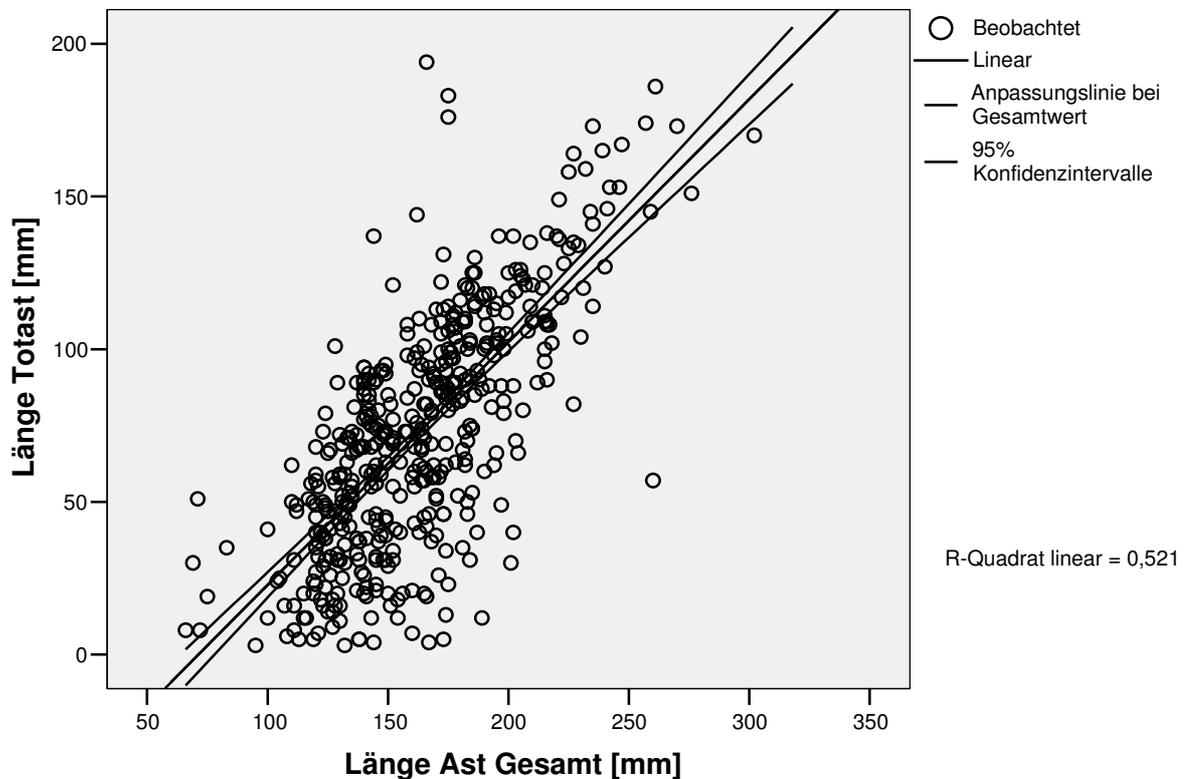


Abbildung 18: alle untersuchten Fichten - Streudiagramm Länge Totast [mm] über der Astlänge [mm].

Tabelle 7: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 18 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Länge Ast Gesamt [mm]	0,795	0,036	0,722	0,000
(Konstante)	-56,661	5,977		0,000

Abbildung 18 zeigt den Zusammenhang zwischen der Astlänge im Rundholzkörper und der Länge des Totastes. Das Bestimmtheitsmaß $[R^2] = 0.521$ unterscheidet sich signifikant von 0,00, das heißt, die Varianz der Streuung der Werte ‚LängeTotast‘ wird zu 52% von der Astlänge beeinflusst.

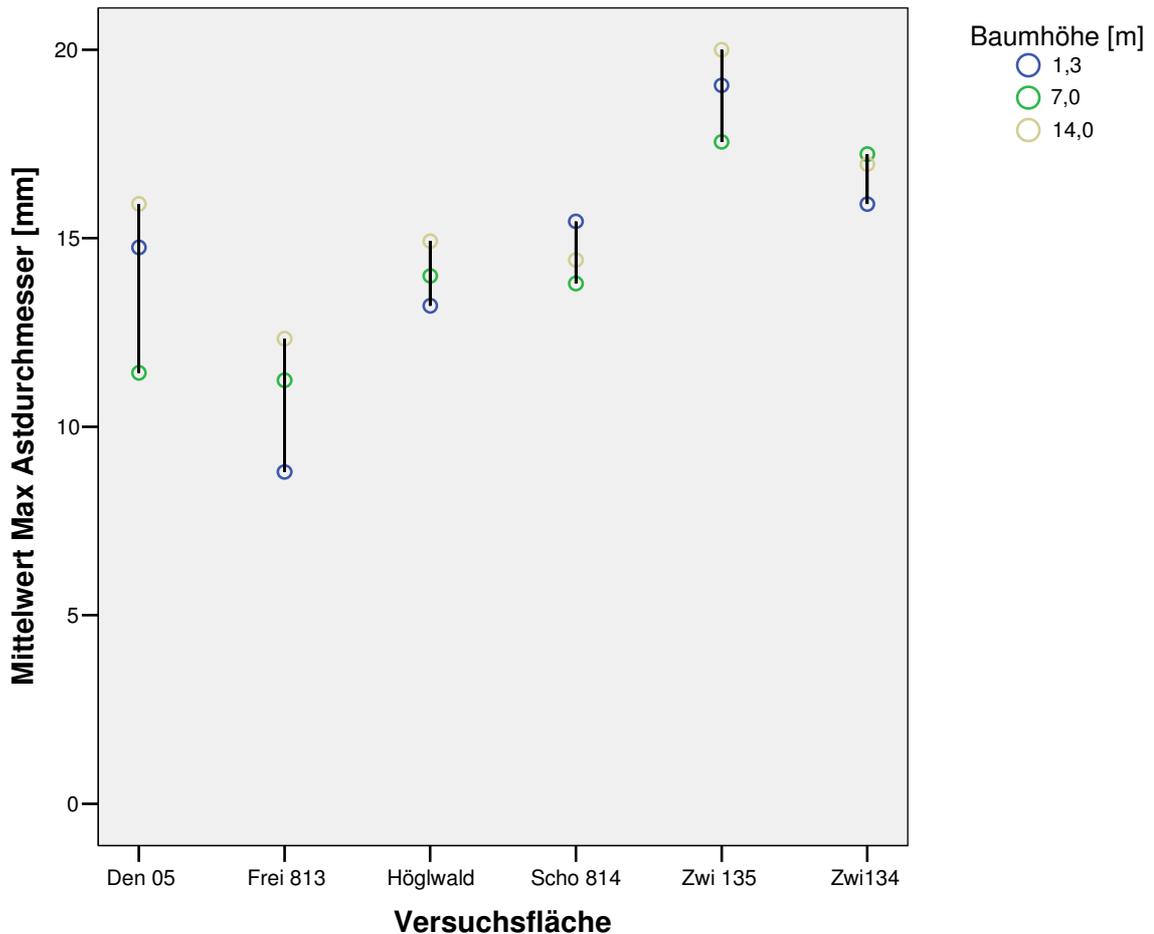


Abbildung 19: Versuchsflächen, Mittelwerte des maximalen Astdurchmessers in drei untersuchten Baumhöhen.

Mittelwerte der maximalen Astdurchmesser [mm] in drei Baumhöhen der sechs beprobten Versuchsflächen zeigt Abbildung 19. Zwischen den Versuchsflächen sind deutlich Unterschiede in den Mittelwerten des maximalen Astdurchmessers in den drei untersuchten Baumhöhen abgebildet. Die größten mittleren Durchmesser haben die Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 135, die niedrigsten mittleren Durchmesser die Fichten der Versuchsfläche Freising 813. Nicht alle Versuchsflächen zeigen einen eindeutigen Trend in der Zunahme oder Abnahme des mittleren Astdurchmessers von der Stammbasis zur Krone. Ein Zunahme des mittleren Astdurchmessers zeigen im Mittel nur die Fichten der Versuchsflächen Freising 813 und Höglwald.

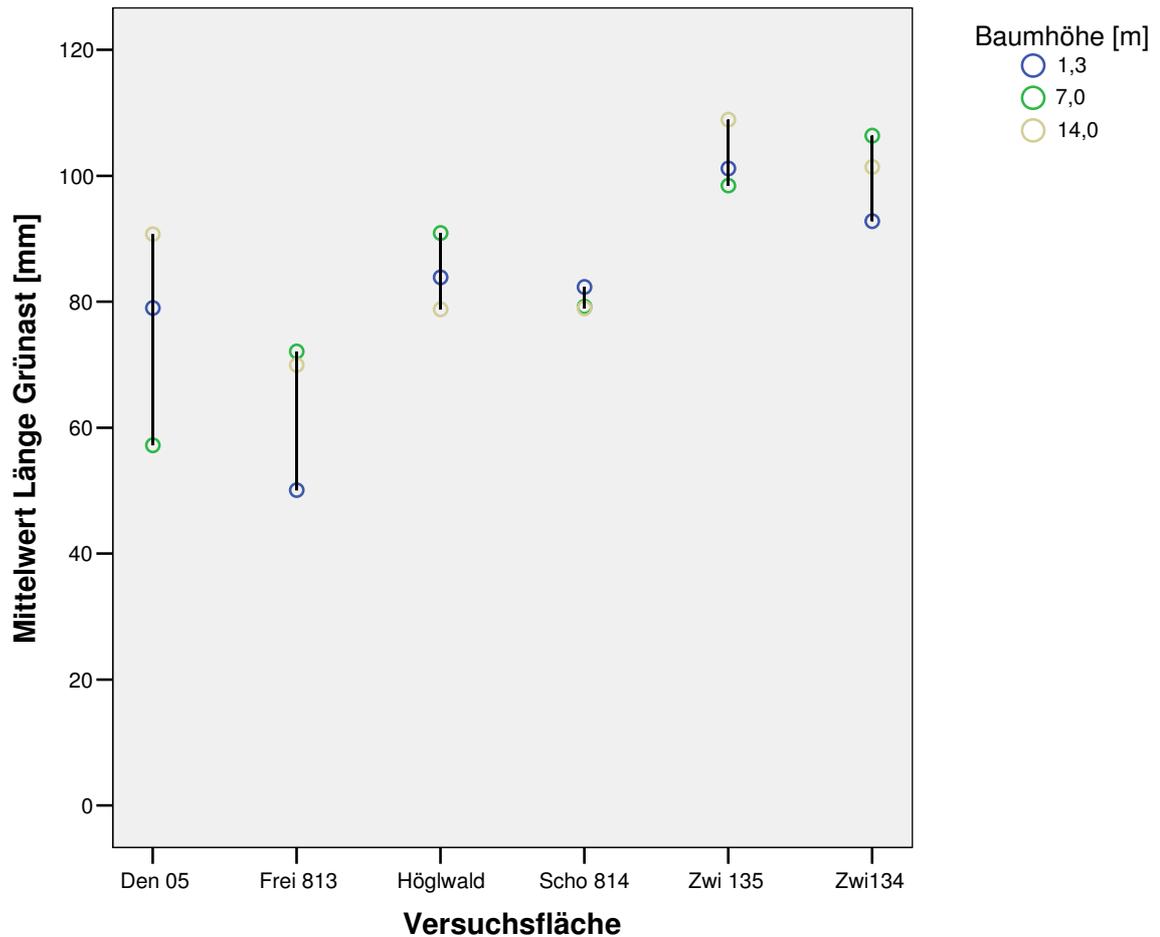


Abbildung 20: Versuchsflächen, mittlere Grünastlänge [mm] in drei untersuchten Baumhöhen.

Mittelwerte der Grünastlängen [mm] in drei Baumhöhen für die sechs verschiedenen Versuchsflächen zeigt Abbildung 20. Die Mittelwerte der Grünastlängen in den untersuchten Baumhöhen unterscheiden sich sehr deutlich zwischen den Versuchsflächen. Die größten mittleren Grünastlängen zeigen die Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 135, dicht gefolgt von Zwiesel 134. Die niedrigsten mittleren Grünastlängen haben die Fichten der Versuchsfläche Freising 813.

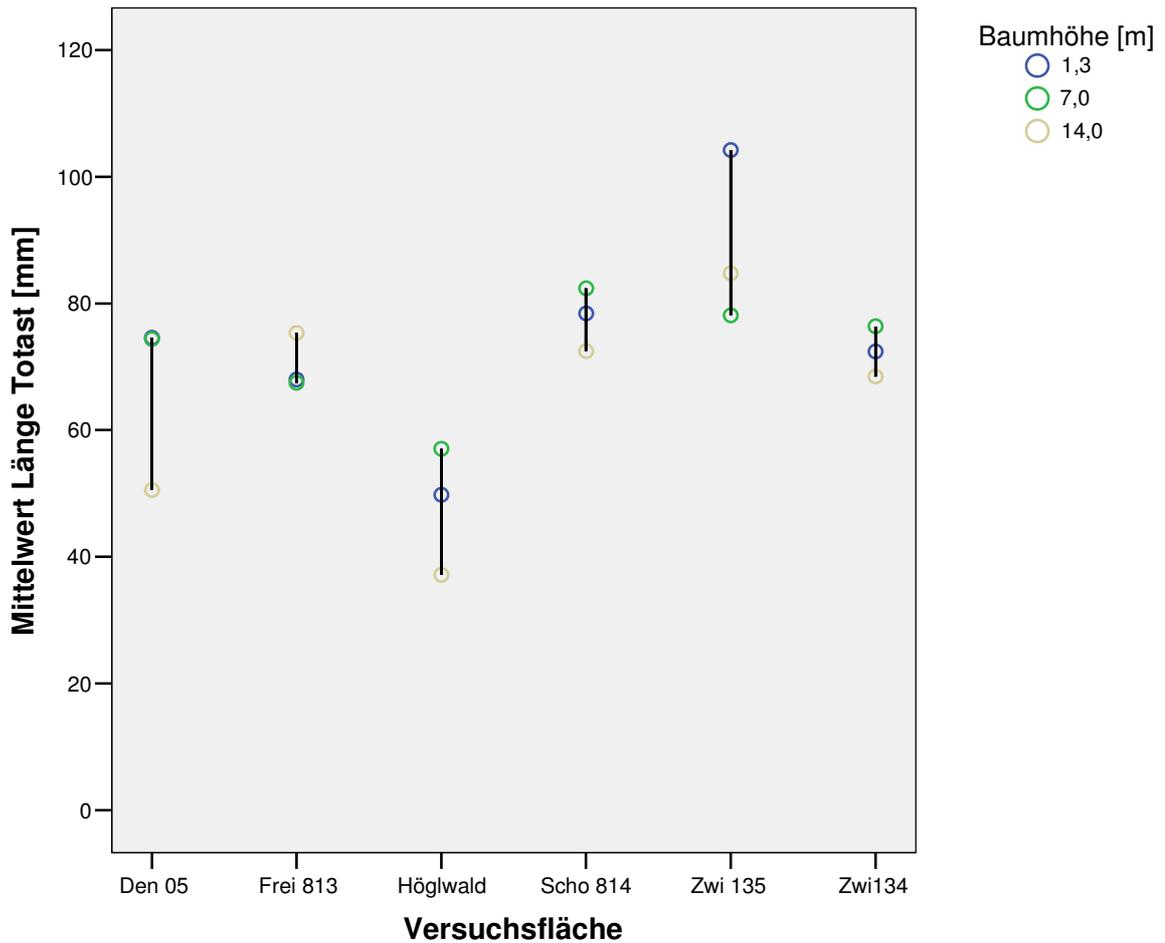


Abbildung 21: Versuchsflächen, mittlere Totastlänge [mm] in drei untersuchten Baumhöhen.

Mittelwerte der Totastlängen [mm] in drei Baumhöhen für die sechs verschiedenen Versuchsflächen zeigt Abbildung 21. Die Mittelwerte der Totastlängen in den untersuchten Baumhöhen unterscheiden sich sehr deutlich zwischen den Versuchsflächen. Die größten mittleren Totastlängen zeigen die Fichten von Zwiesel 135, die niedrigsten mittleren Durchmesser haben die Fichten der Versuchsfläche Höglwald. Es ist wie bei den mittleren Grünastlängen kein Trend auf den sechs Versuchsflächen zu erkennen, der eine Zunahme oder Abnahme der mittleren Totastlänge von der Stammbasis zur Krone zeigen würde.

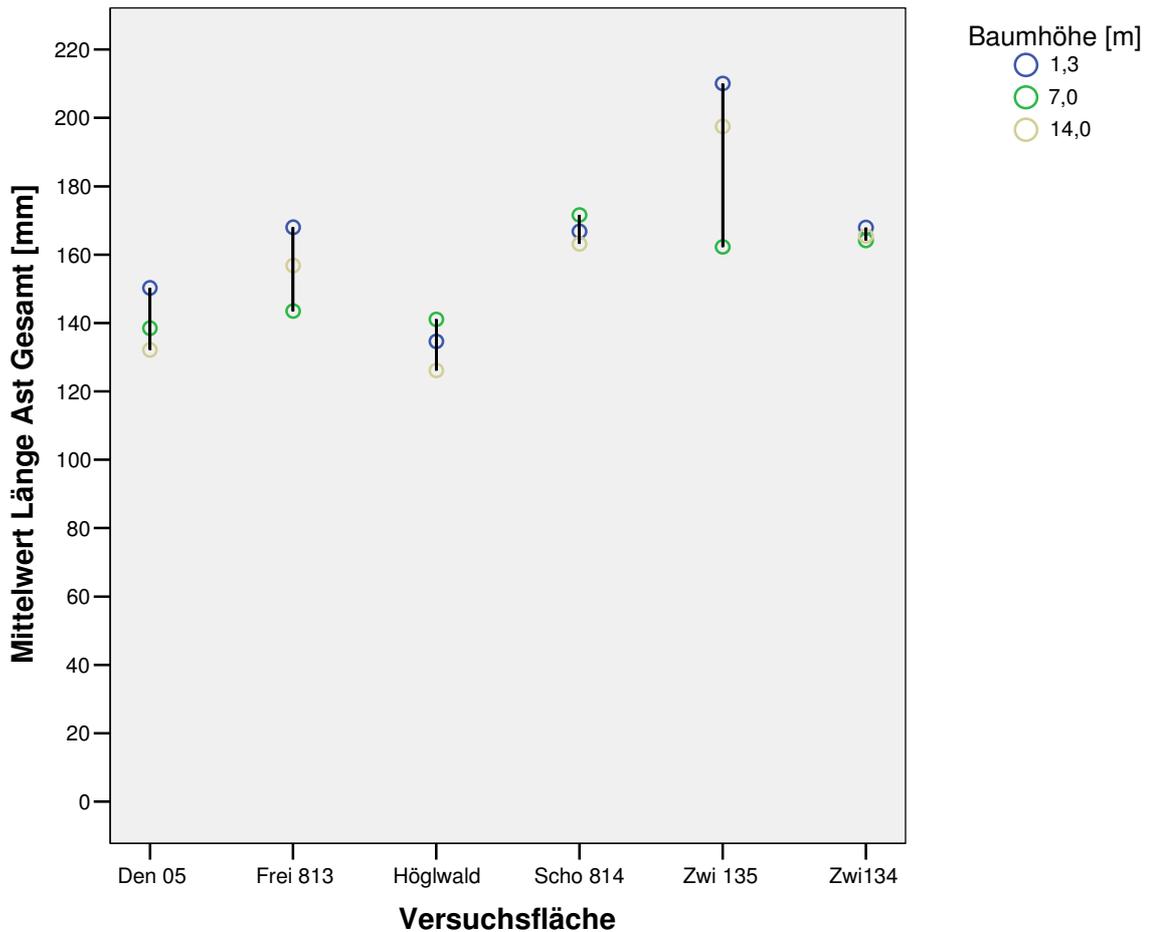


Abbildung 22: Sechs Versuchsflächen, mittlere Astlänge [mm] in den drei untersuchten Baumhöhen.

Mittelwerte der Astlängen [mm] in drei Baumhöhen für die verschiedenen Versuchsflächen zeigt Abbildung 22. Zwischen den Versuchsflächen unterscheiden sich die Mittelwerte der Astlängen in den untersuchten Baumhöhen sehr deutlich. Die größten mittleren Astlängen zeigen die Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 135. Die niedrigsten mittleren Astlängen haben die Fichten der Versuchsfläche Höglwald. Wie auch bei den untersuchten Kenngrößen Astdurchmesser, Grün- oder Totastlänge ist kein eindeutiger Trend bezüglich der Zunahme oder Abnahme der mittleren Astlänge von der Stammbasis zur Krone zu erkennen.

Tabelle 8: Anzahl Äste pro untersuchter Baumhöhe und Versuchsfläche

Versuchsfläche	Baumhöhe [m]	Anzahl Äste [N]
5	1,3	60
	7,0	17
	14,0	25
Anzahl alle drei Baumhöhen [N]		102
7	1,3	23
	7,0	21
	14,0	28
Anzahl alle drei Baumhöhen [N]		72
134	1,3	89
	7,0	74
	14,0	94
Anzahl alle drei Baumhöhen [N]		259
135	1,3	25
	7,0	14
	14,0	16
Anzahl alle drei Baumhöhen [N]		55
813	1,3	30
	7,0	35
	14,0	32
Anzahl alle drei Baumhöhen [N]		97
814	1,3	63
	7,0	80
	14,0	93
Anzahl alle drei Baumhöhen [N]		243
Gesamt Anzahl Äste [N]		828

4.2 Reaktionsholz Fichte – Zwiesel 134 und Zwiesel 135

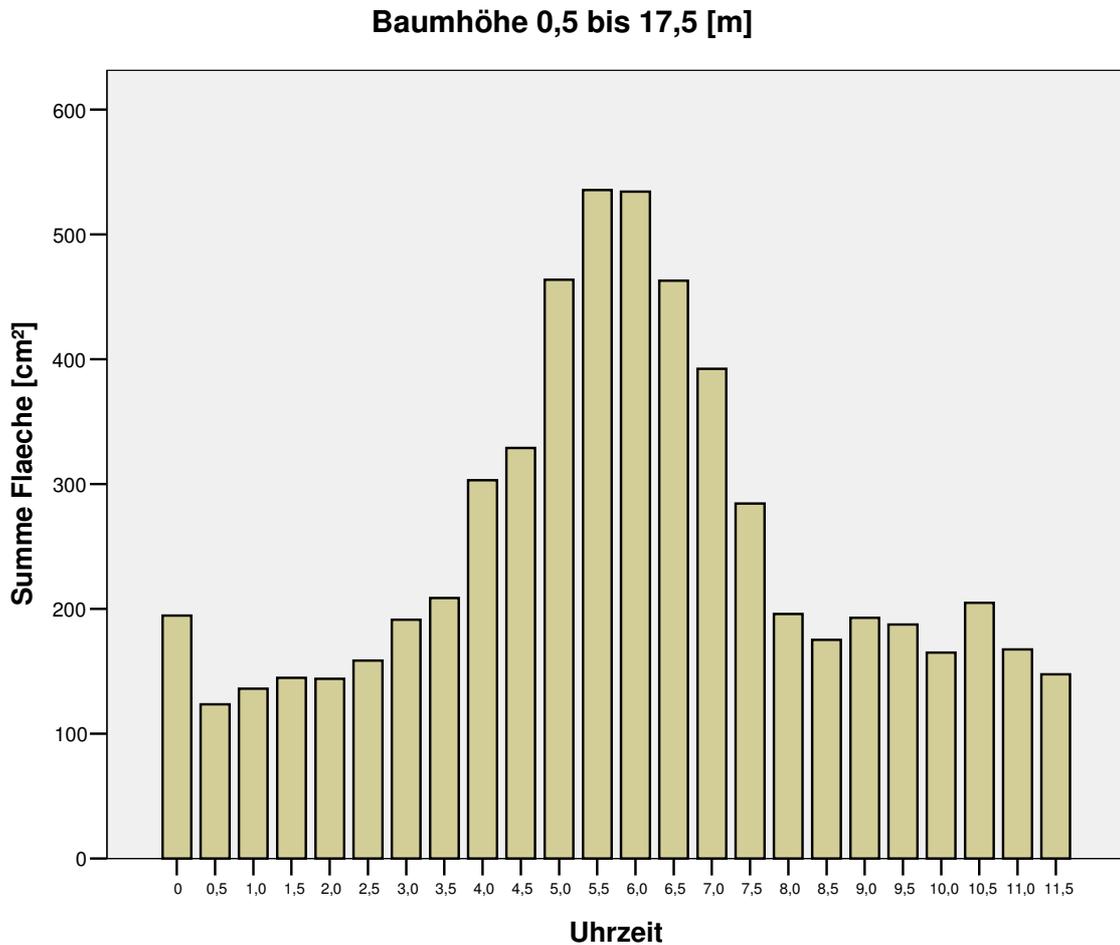


Abbildung 23: Zwiesel 134 und 135, Summe der Reaktionsholzflächen [cm²] pro Uhrzeit (analoges Ziffernblatt).

Der summarische Flächenanteil von Reaktionsholz für alle Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 zeigt Abbildung 23. Die deutlich höchsten Flächenanteile liegen in den Uhrzeiten 5 bis 7 Uhr, welches der Südrichtung im Stamm entspricht.

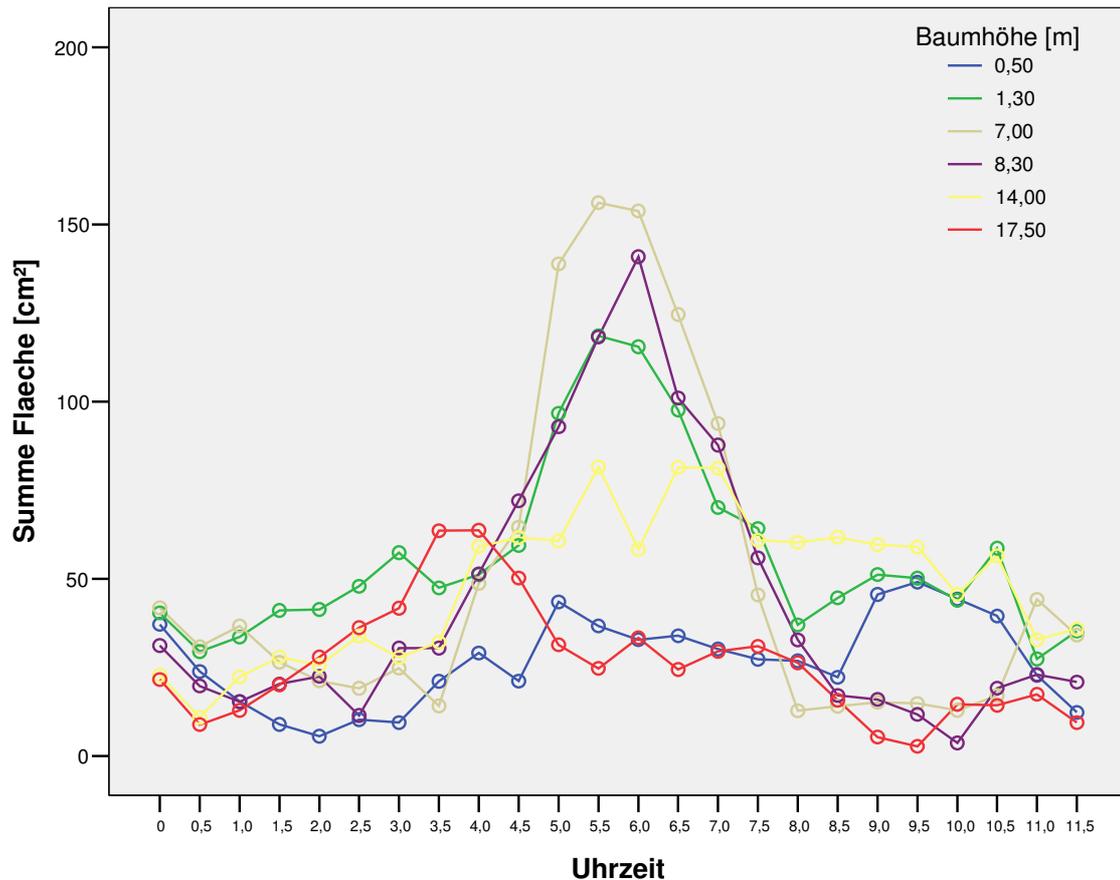


Abbildung 24: Zwiesel 134 und 135, Summe Reaktionsholzflächen [cm²] pro Uhrzeit (analoges Ziffernblatt) in sechs verschiedenen Baumhöhen.

Abbildung 24 zeigt den summarischen Flächenanteil von Reaktionsholz für alle Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 in verschiedenen Baumhöhen. In den Uhrzeiten 5 bis 7 Uhr liegen die deutlich höchsten Flächenanteile. Diese Uhrzeiten entsprechen genau der Südrichtung im Stamm. Die größten summarischen Flächenanteile zeigen die mittleren Stammhöhen zwischen 1.3 [m] und 8.3 [m].

4.3 Rohdichte [rho12] nach DIN 52 182 (radiale Messung) an Fichte – Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135

4.3.1 Mittlere Rohdichte [rho12]

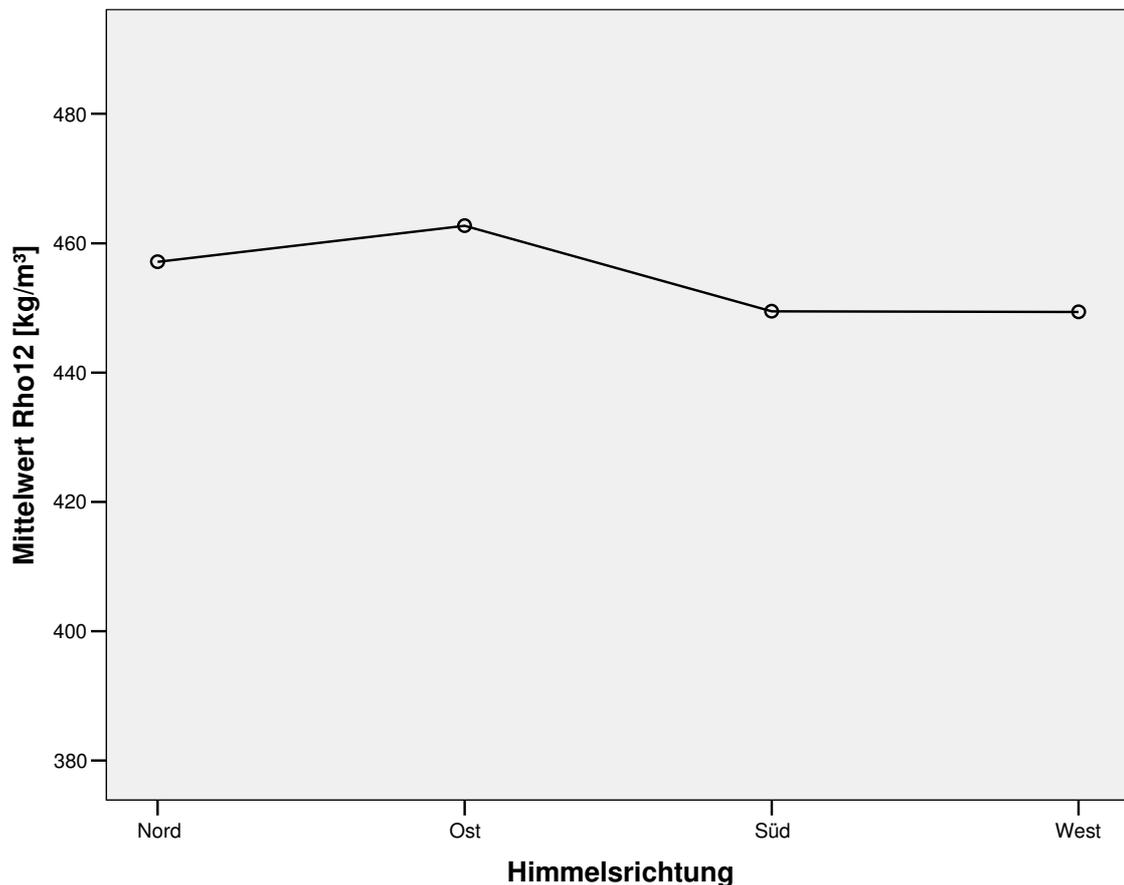


Abbildung 25: Zwiesel 134 und 135, mittlere Rohdichte [rho12] über den vier Haupthimmelsrichtungen.

In Abbildung 25 ist die mittlere Rohdichte [rho12] in den Haupthimmelsrichtungen für alle Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 dargestellt. Alle Mittelwerte liegen sehr dicht beieinander. Bei allen Fichten zeigt sich der höchste Rohdichtemittelwert in der Ost-Himmelsrichtung.

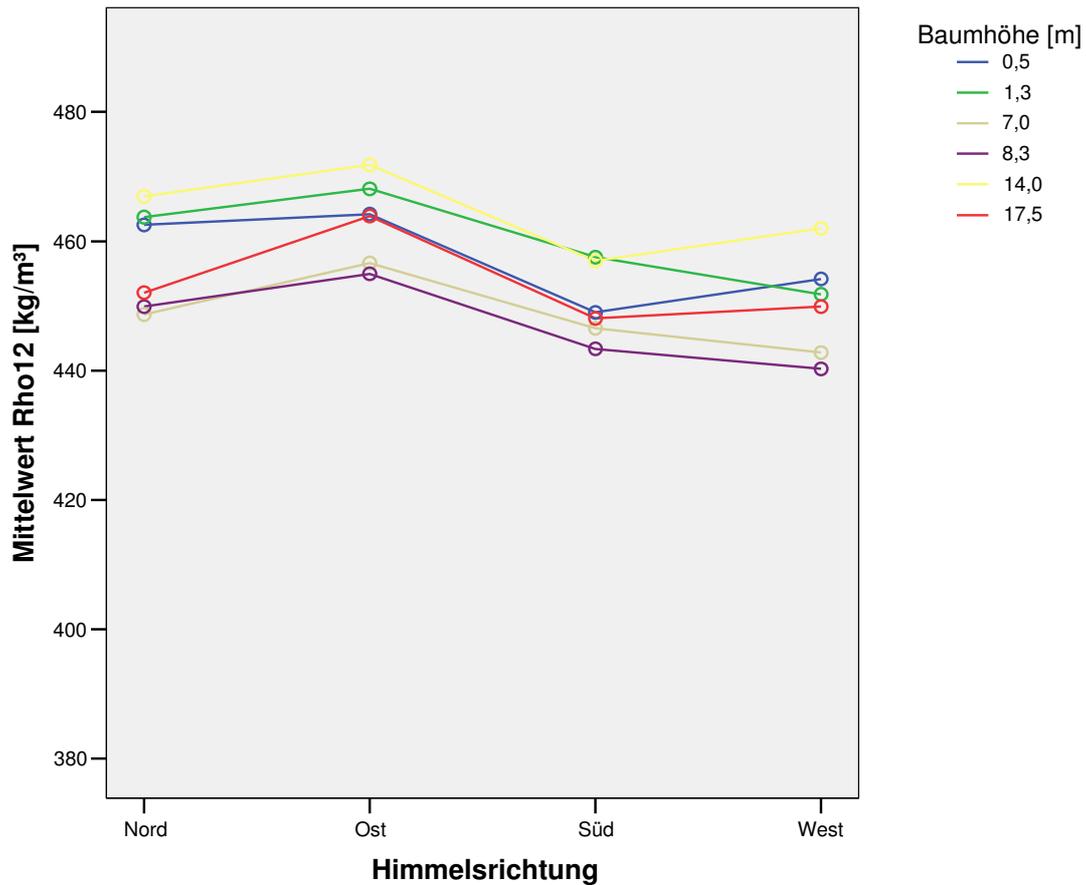


Abbildung 26: Zwiesel 134 und 135, mittlere Rohdichte [ρ_{12}] in sechs verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 26 zeigt für alle Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 die mittlere Rohdichte [ρ_{12}] in sechs verschiedenen Baumhöhen in den vier Haupthimmelsrichtungen. Es zeichnet sich keine Zu- oder Abnahme der Rohdichte vom Stammfuß zur Krone ab. Die höchsten Rohdichtewerte zeigen sich im Mittel in 14 [m] Stammhöhe. Auffallend ist, dass in allen untersuchten Baumhöhen die höchsten Rohdichtemittelwerte in der Ost-Himmelsrichtung liegen. Die Rohdichtemittelwerte (> 440 [kg/m^3]) liegen bis auf den Wert der Ostrichtung der Baumhöhe 14 [m] unterhalb des in der Literatur angegebenen Mittelwert von 470 [kg/m^3] bei einer Holzfeuchte von $u = 12\%$.

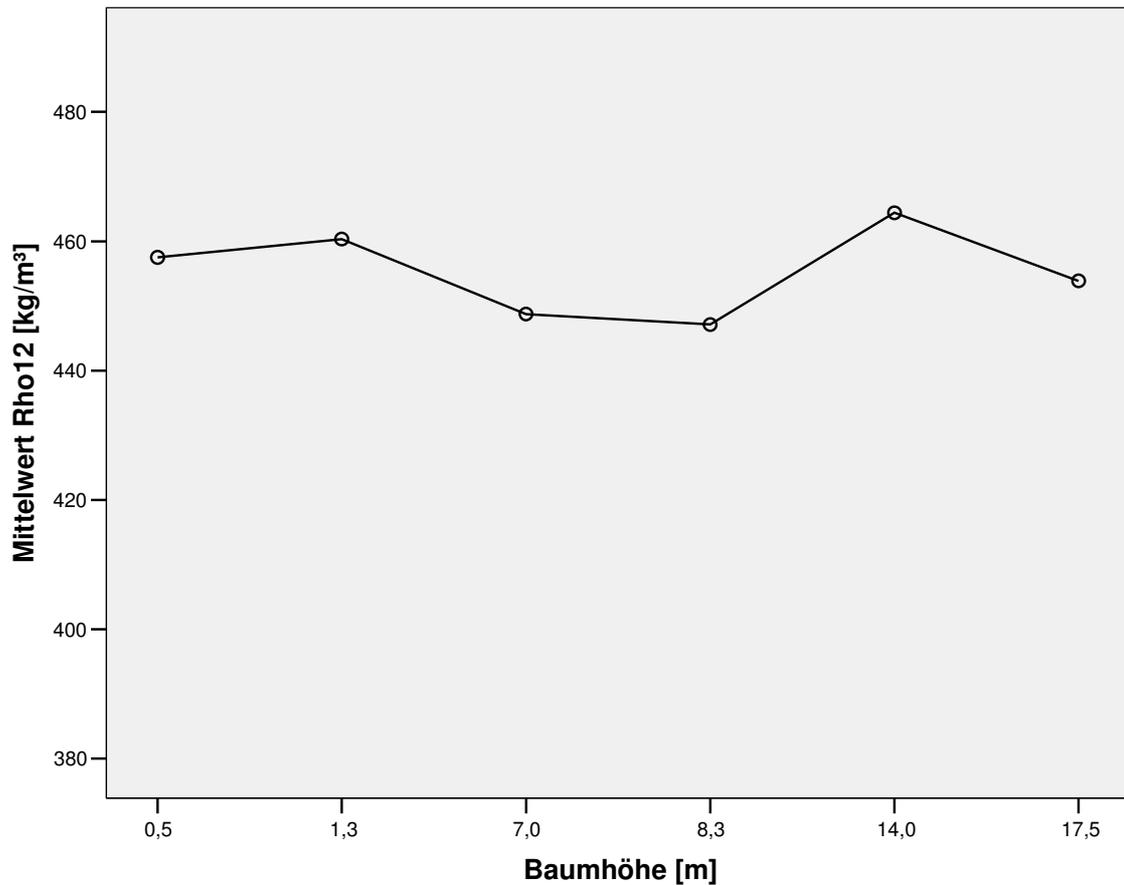


Abbildung 27; Zwiesel 134 und 135, mittlere Rohdichte [rho12] in sechs verschiedenen Baumhöhen.

Abbildung 27 zeigt die mittlere Rohdichte [rho12] in sechs verschiedenen Baumhöhen für alle Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135. Die Rohdichtemittelwerte zeigen keinen Trend bezüglich einer Zu- oder Abnahme vom Stammfuß zur Krone. Die höchste Rohdichte zeigt sich im Mittel in 14 [m] Höhe. Alle Mittelwerte liegen dicht beieinander unterhalb 470 [kg/m³], dem in der Literatur angegebenen Mittelwert.

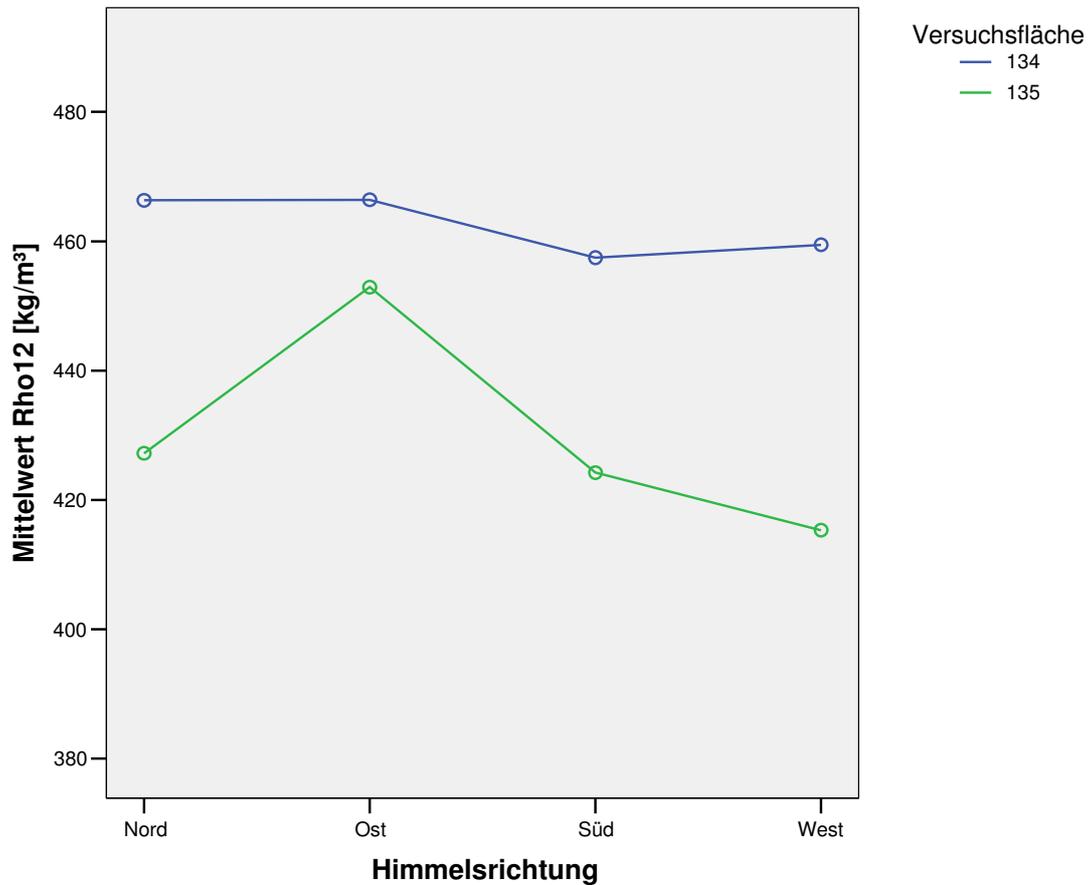


Abbildung 28: Zwiesel 134 und 135, mittlere Rohdichte [rho12] über den Haupthimmelsrichtungen.

Die mittlere Rohdichte [rho12] in den Haupthimmelsrichtungen getrennt für die Versuchsfächen Zwiesel 134 und 135, zeigt Abbildung 28. Die Rohdichtewerte der Fichten der Versuchsfäche Zwiesel 134 liegen sehr deutlich im Mittel über 450 [kg/m³] und über den Werten von Zwiesel 135. Bei den Fichten von Zwiesel 134 liegen die Rohdichtewerte in den vier Haupthimmelsrichtungen auf etwa gleichem Niveau. Die Fichten von Zwiesel 135 zeigen dagegen einen ausgeprägten höheren Rohdichtewert in der Ost-Himmelsrichtung im Vergleich zu den anderen drei Himmelsrichtungen.

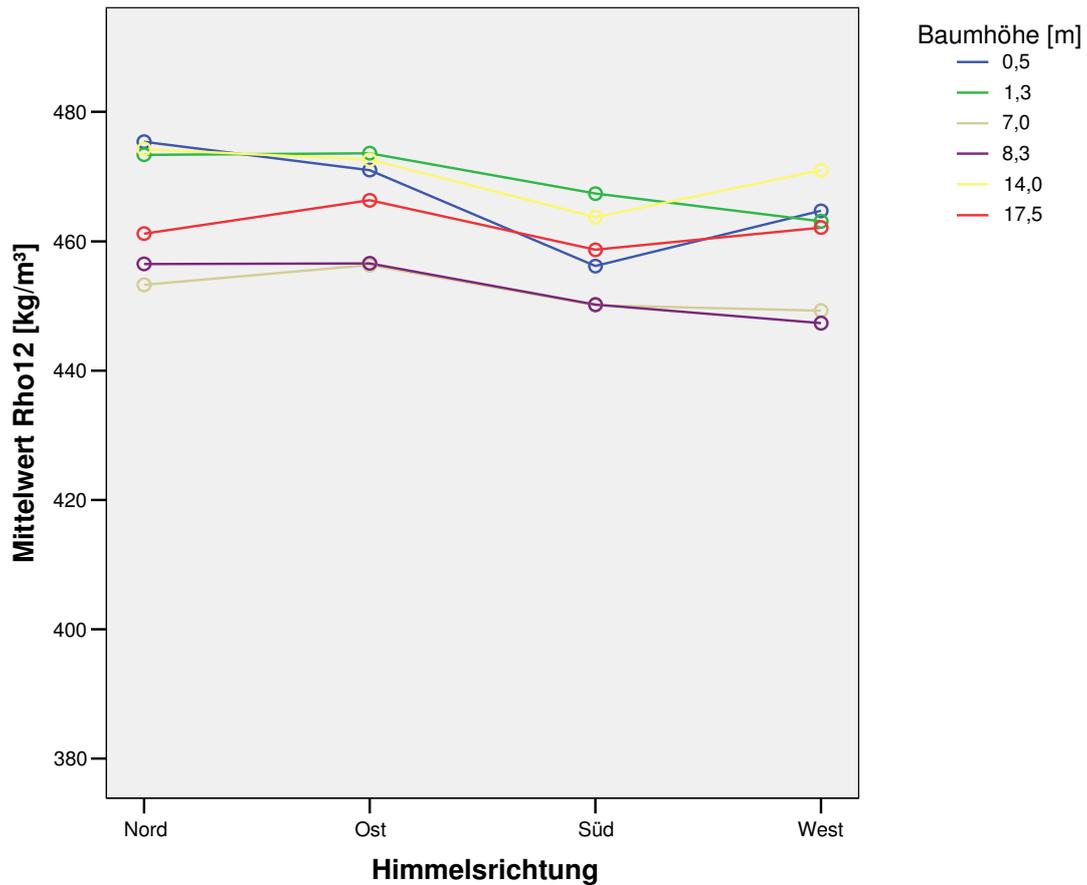


Abbildung 29: Zwiesel 134, mittlere Rohdichte [ρ_{12}] in sechs verschiedenen Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen.

Die mittlere Rohdichte [ρ_{12}] in sechs untersuchten Baumhöhen der vier Haupthimmelsrichtungen für alle Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 134 zeigt Abbildung 29. Es ist kein Trend bezüglich einer Zu- oder Abnahme vom Stammfuß zur Krone zu erkennen. Die höchste Rohdichte zeigt sich im Mittel in 1.3 [m] als auch in 14 [m] Höhe. Alle Mittelwerte liegen sowohl in bezug auf die Baumhöhe als auch zwischen den vier Himmelsrichtungen dicht beieinander (450 – 475 kg/m^3).

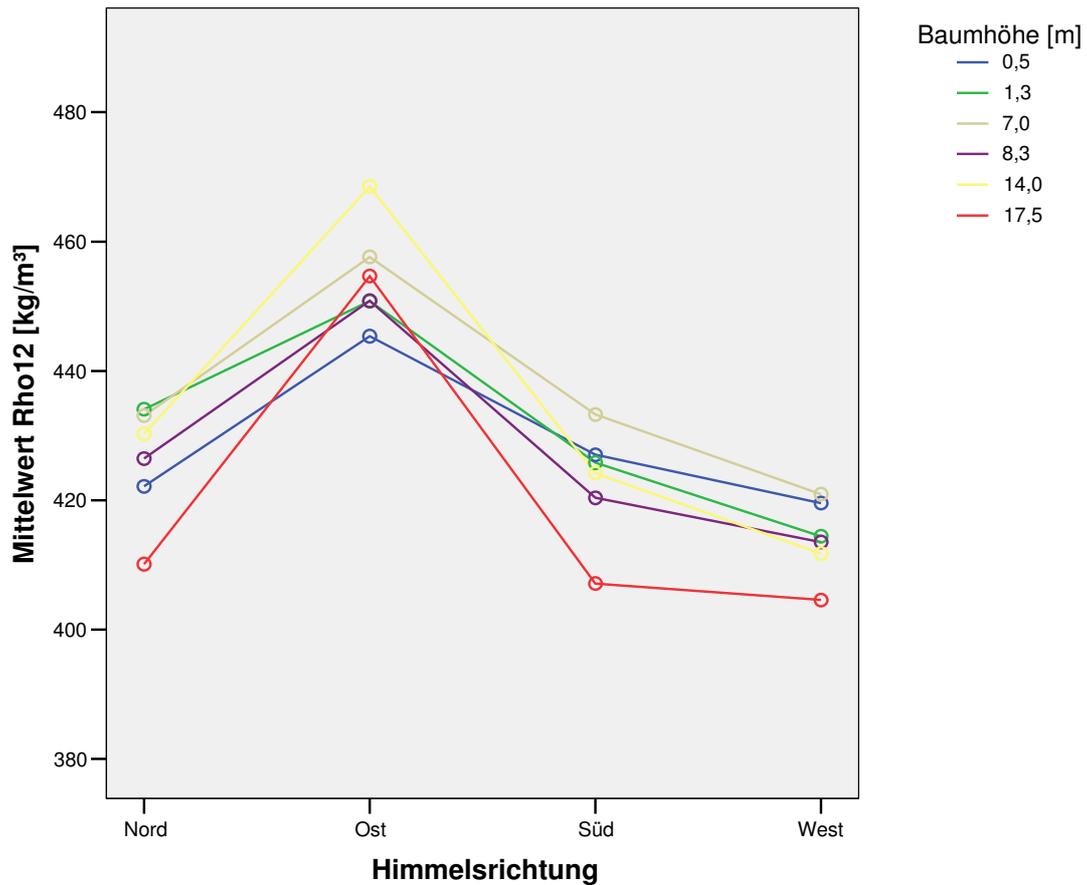


Abbildung 30: Zwiesel 135, mittlere Rohdichte [ρ_{12}] in sechs verschiedenen Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 30 zeigt die mittlere Rohdichte [ρ_{12}] in sechs verschiedenen Baumhöhen in den vier Haupthimmelsrichtungen für alle Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 135. Die Rohdichte zeigt keinen Trend in der Zu- oder Abnahme vom Stammfuß zur Krone. Die Mittelwerte für die sechs Baumhöhen, betrachtet in den vier Haupthimmelsrichtungen, liegen dicht beieinander. Bei allen Fichten zeigt sich eine erhöhte mittlere Rohdichte in allen sechs Baumhöhen in der Ost-Himmelsrichtung im Vergleich zu den anderen drei Himmelsrichtungen.

4.3.2 Anzahl Jahrringe pro Prüfkörper (Fichte)

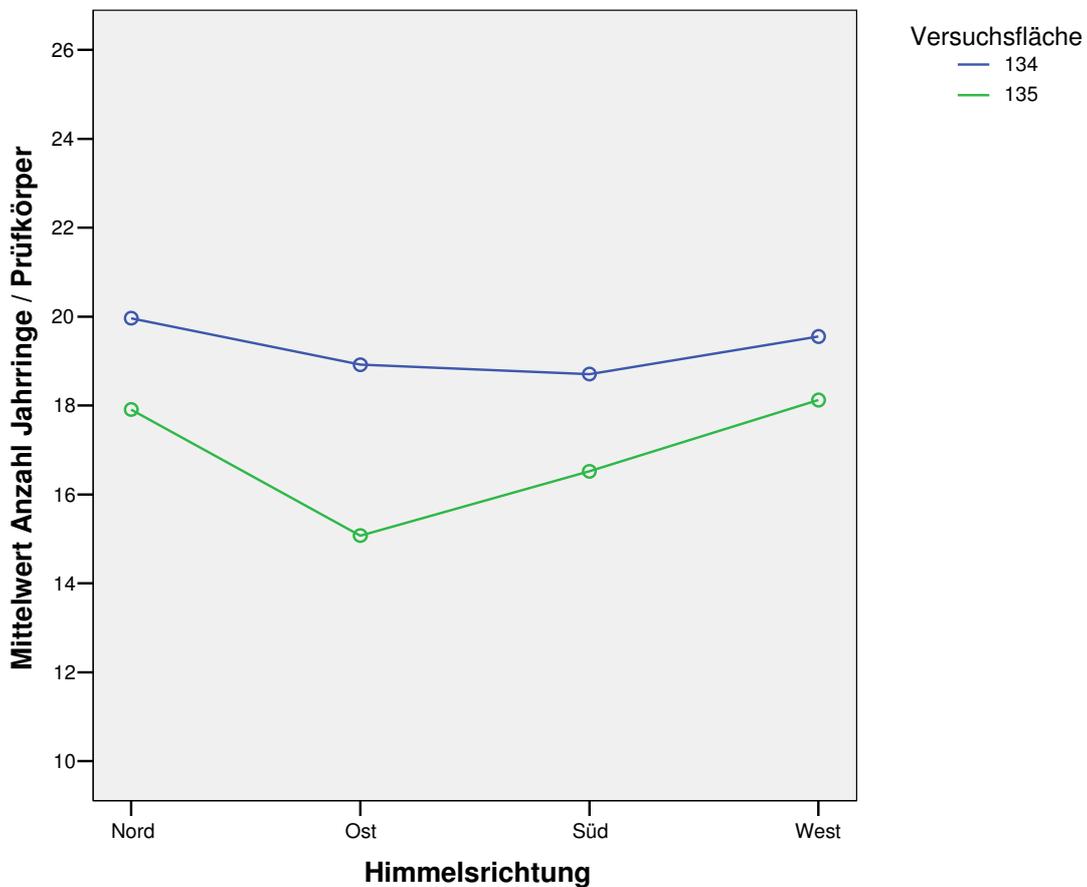


Abbildung 31: Zwiesel 134 und 135, mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Die mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in den Haupthimmelsrichtungen für die Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 ist in Abbildung 31 dargestellt. Die Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 134 haben im Mittel mehr Jahrringe pro Prüfkörper als die Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 135. Daraus ergibt sich, dass dort schmalere Jahrringe ausgebildet wurden. Auffallend zeigt sich die niedrigste Anzahl von Jahrringen pro Prüfkörper in der Osthimmelsrichtung der Fichten von Zwiesel 135. In dieser Himmelsrichtung sind die breitesten Jahrringe aber auch die höchsten Rohdichtemittelwerte vorhanden, wie in Abb. 30 erkennbar.

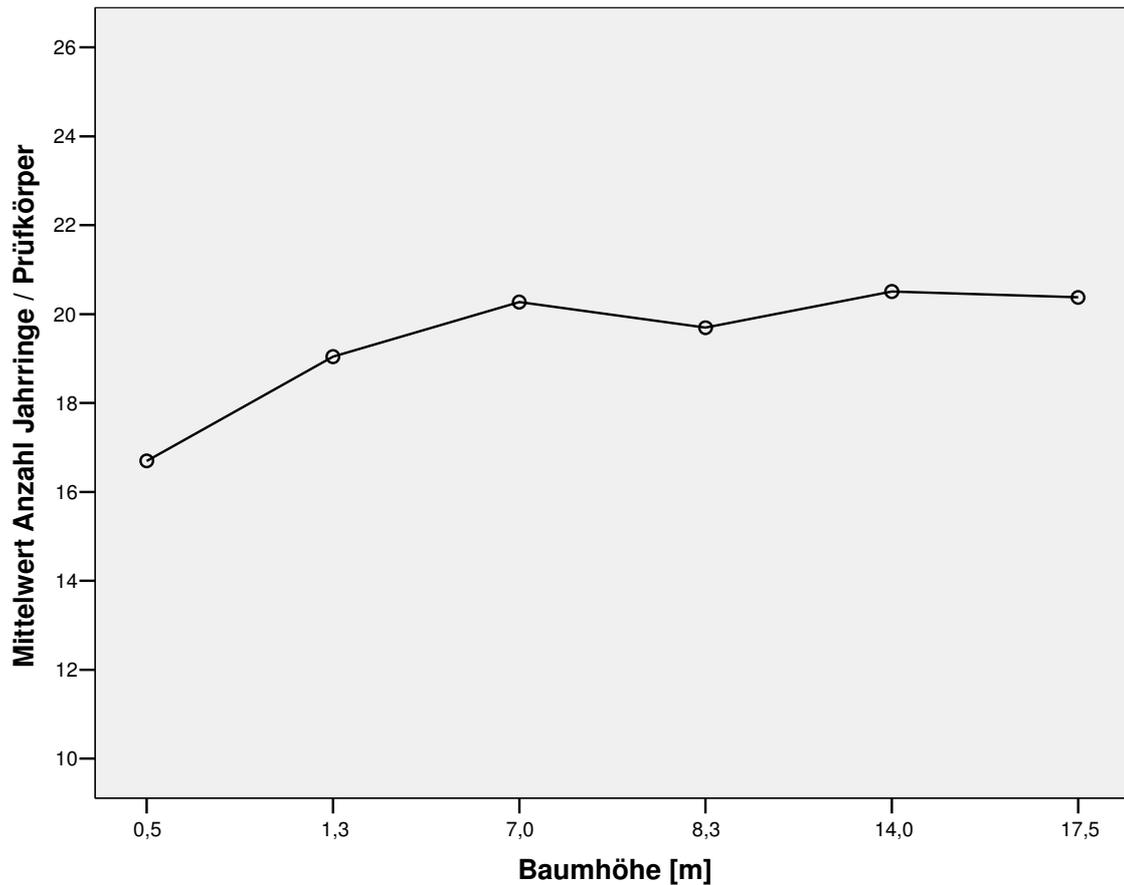


Abbildung 32: Zwiesel 134 und 135, mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in verschiedenen sechs Baumhöhen.

In Abbildung 32 ist für beide Versuchsflächen zusammen die mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in verschiedenen Baumhöhen dargestellt. Die Anzahl der Jahrringe nimmt von der Stammbasis zur Krone im Mittel zu, d. h. die Fichten bilden im Durchschnitt ‚schmalere‘ Jahrringe im Kronenbereich und haben ihren höchsten Zuwachs im unteren Stammbereich.

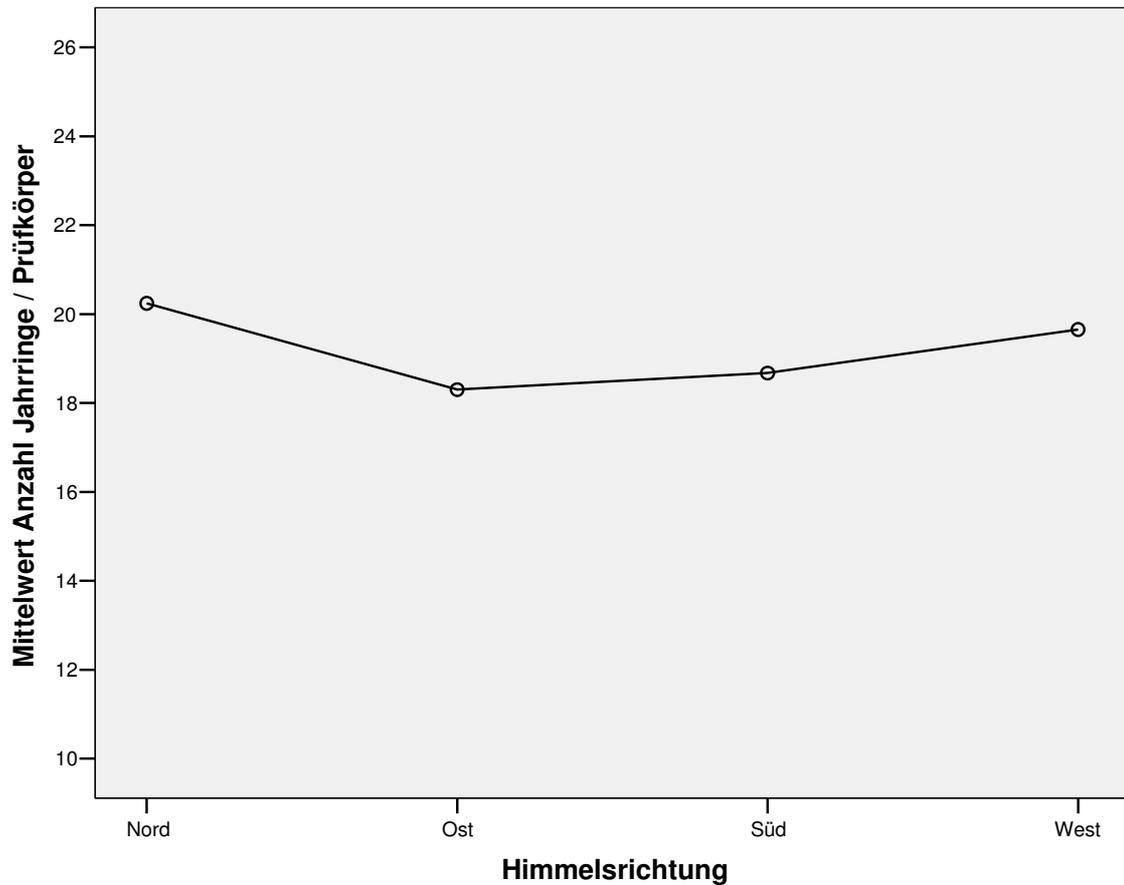


Abbildung 33: Zwiesel 134 und 135, mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 33 zeigt für die Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 die mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in den Haupthimmelsrichtungen. In der Nordrichtung haben die Fichten im Mittel knapp 1-2 Jahrringe mehr als in den anderen Himmelsrichtungen. Daraus abgeleitet bedeutet dieses etwas schmalere Jahrringe an dieser Stelle.

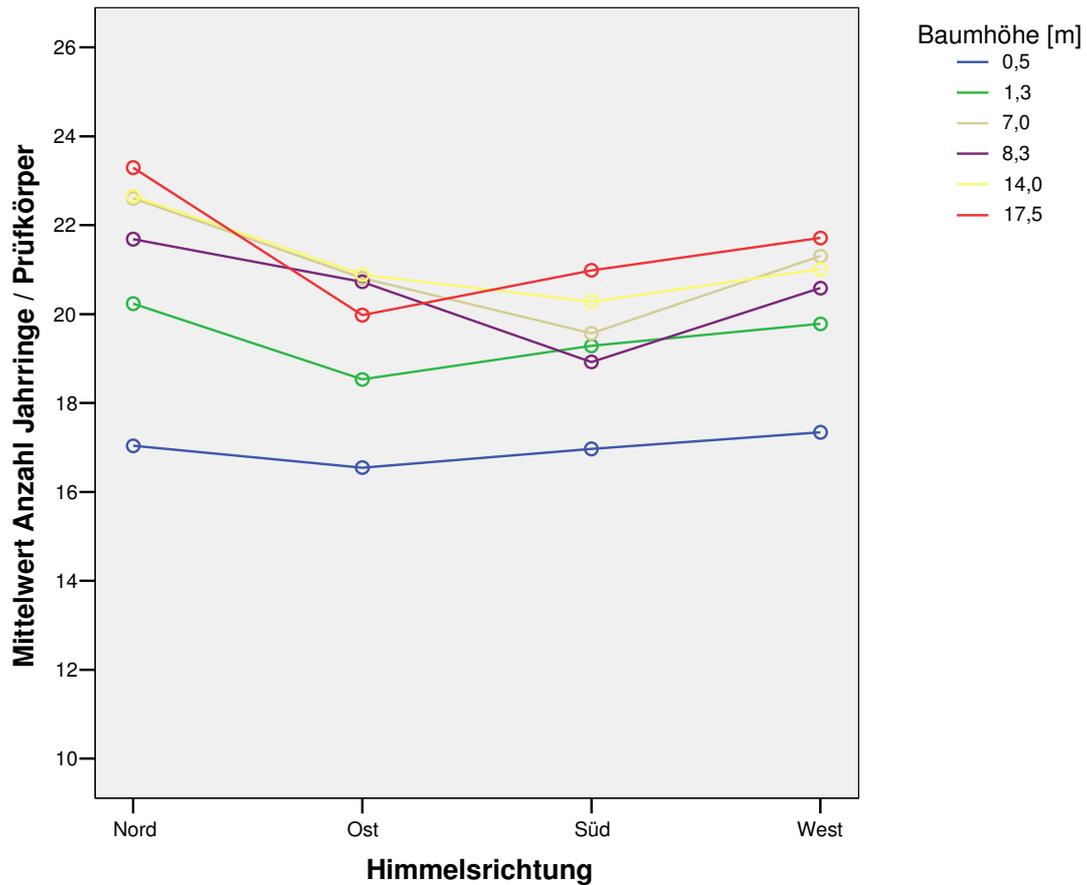


Abbildung 34: Zwiesel 134, mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in sechs verschiedenen Baumhöhen in den vier Haupthimmelsrichtungen.

In Abbildung 34 ist die Anzahl der Jahrringe pro Prüfkörper in unterschiedlichen Baumhöhen in den Haupthimmelsrichtungen der Fichten von der Versuchsfläche Zwiesel 134 dargestellt. Die niedrigste Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper liegt in der untersten Stammhöhe von 0.5 [m]. Bei den Baumhöhen von 1.3 [m] bis 17.5 [m] liegen die Mittelwerte relativ dicht beieinander und haben ihre höchste Anzahl von Jahrringen jeweils in der Nordhimmelsrichtung. Daraus lässt sich schließen, dass sie dort ihre schmalsten Jahrringe bildeten.

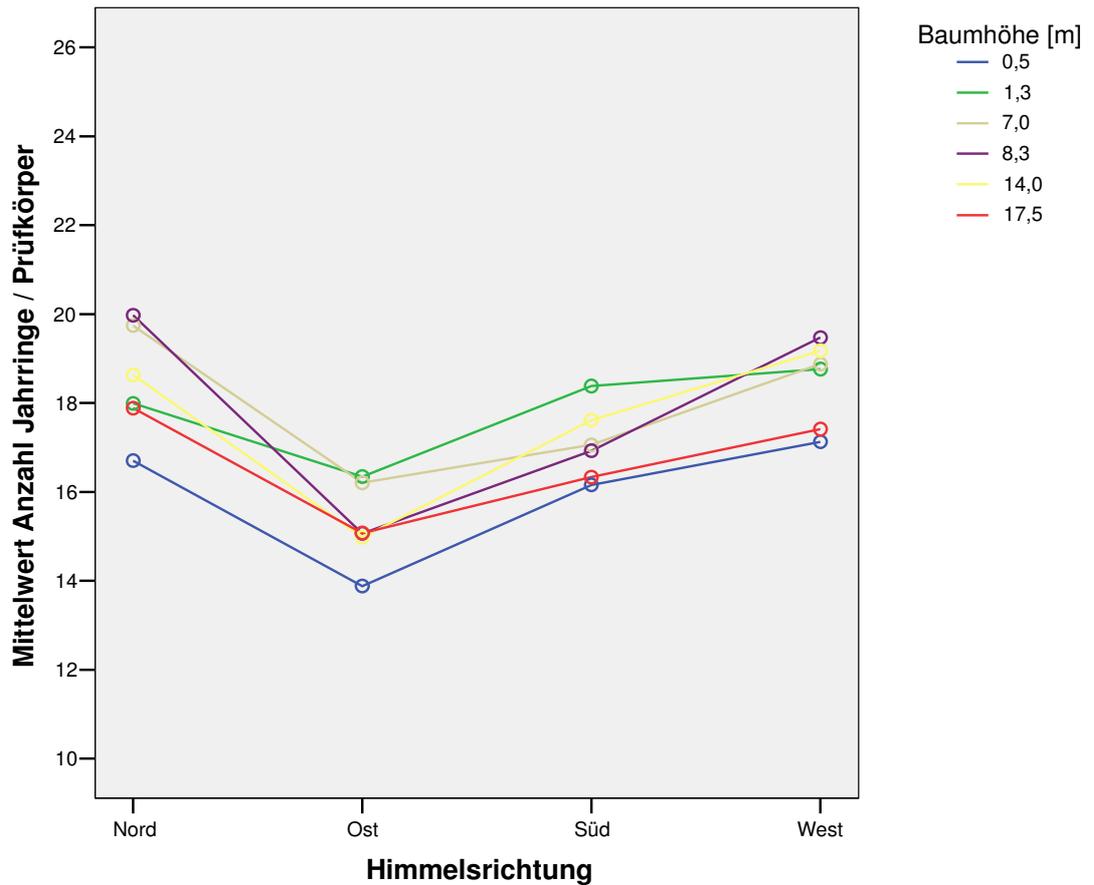


Abbildung 35: Zwiesel 135, mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in sechs verschiedenen Baumhöhen in den vier Haupthimmelsrichtungen.

In Abbildung 35 ist die mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in verschiedenen Baumhöhen in den Haupthimmelsrichtungen für die Fichten der Versuchsfäche Zwiesel 135 dargestellt. In allen Baumhöhen liegt die niedrigste Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in der Ostrichtung. Daraus ergibt sich, dass sie in der Ostrichtung die breitesten Jahrringbreiten bilden. Wie Abbildung 30 zeigt, liegen dort die höchsten Rohdichtewerte.

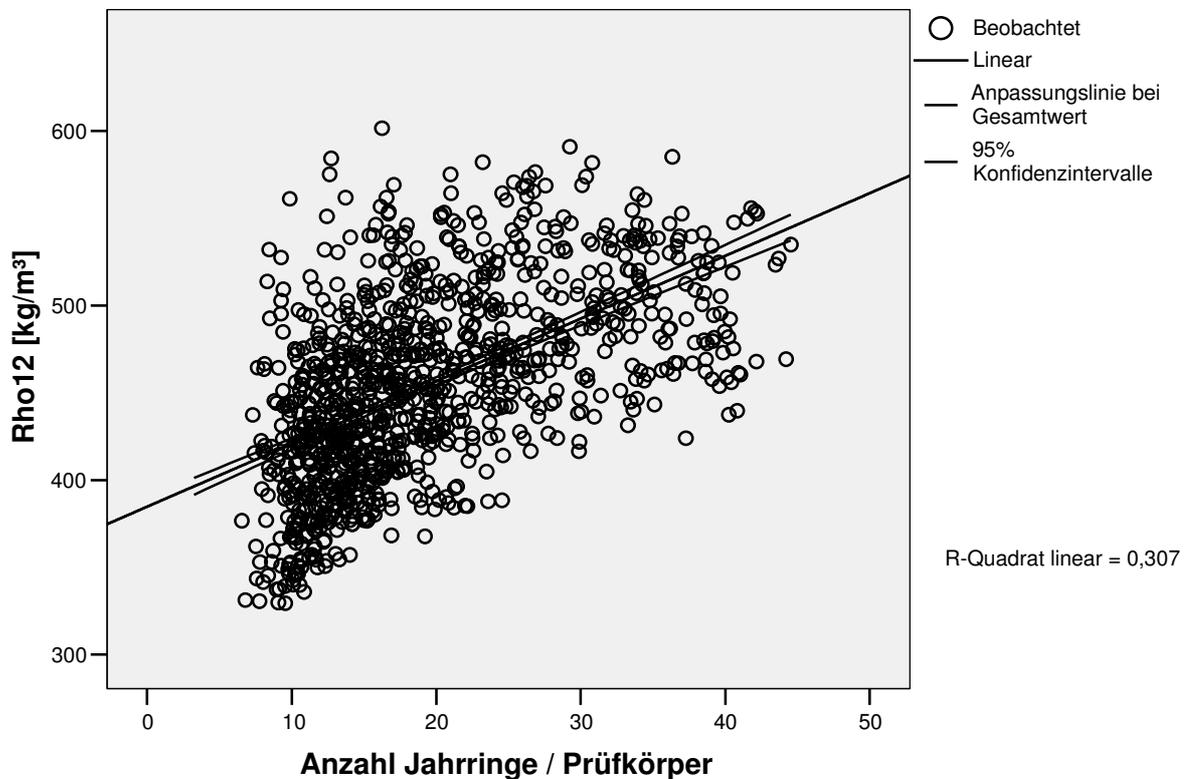


Abbildung 36: Zwiesel 134 und 135, Streudiagramm von Rohdichte [rho12] über Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper.

Tabelle 9: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 36 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Anzahl Jahrringe / Prüfkörper	3,593	0,167	0,554	0,000
(Konstante)	384,758	3,498		0,000

Der Einfluss der Anzahl der Jahrringe pro Prüfkörper auf die Rohdichte [rho12] bei allen untersuchten Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 ist in Abbildung 36 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß [R²] beträgt 0.31 und unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der Rohdichtemittelwerte [rho12] wird nur zu 31% durch die Anzahl der Jahrringe im Prüfkörper und daraus abgeleitet von der Jahrringbreite beeinflusst.

4.3.3 Einzelbaumweise Auswertung: Min, Mittel, Max.

Anmerkung:

Von allen untersuchten Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 markieren die drei Fichten der einzelbaumweisen Auswertung den unteren, mittleren und oberen Bereich der Rohdichtewertestreuung.

Die **Fichte Nr. 69** besitzt im Mittel die niedrigste Rohdichte von allen untersuchten Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135.

Die **Fichte Nr. 67** besitzt im Mittel den Rohdichtemittelwert der am nächsten dem Mittelwert aller untersuchten Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 entspricht.

Die **Fichte Nr. 73** besitzt im Mittel die höchste Rohdichte von allen untersuchten Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135.

Fichte Nr. 69

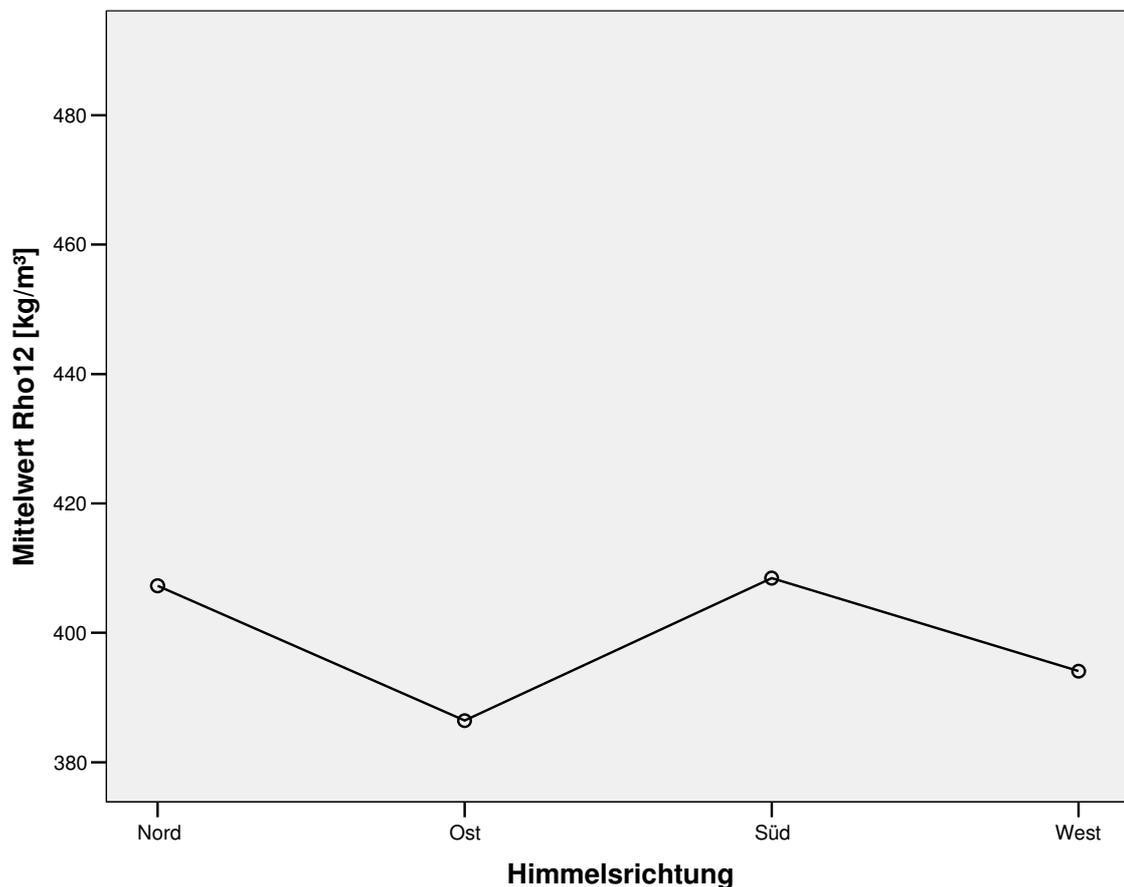


Abbildung 37: Fichte Nr. 69, mittlere Rohdichte [rho12] über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 37 zeigt den Verlauf der Rohdichtemittelwerte der Fichte Nr. 69 in den Haupthimmelsrichtungen. Der niedrigste Rohdichtewert liegt im Osten. Alle Werte liegen zwischen 390 und 410 [kg/m³] und damit sehr deutlich unter 470 [kg/m³], dem in der Literatur für Fichte angegebenen Mittelwert bei einer Holzfeuchte von $u = 12\%$.

Fichte Nr. 69

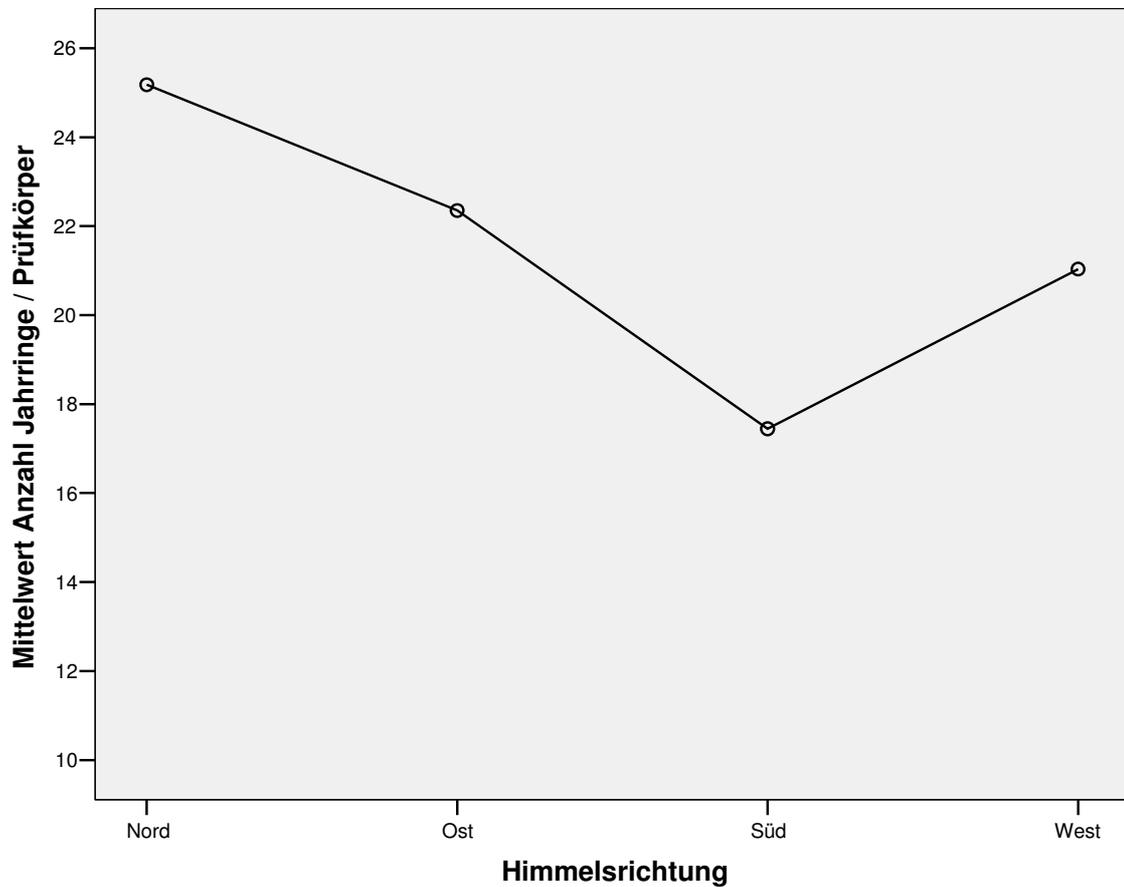


Abbildung 38: Fichte Nr. 69, mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 38 zeigt die mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in den Haupthimmelsrichtungen für die Fichte Nr. 69. Die mittlere Anzahl der Jahrringe pro Prüfkörper hat ihren deutlich niedrigsten Wert in der Süd- und höchsten Wert in der Nordrichtung. In der Südrichtung sind die breitesten Jahrringe vorhanden. In der Nordrichtung liegen die schmalsten.

Fichte Nr. 67

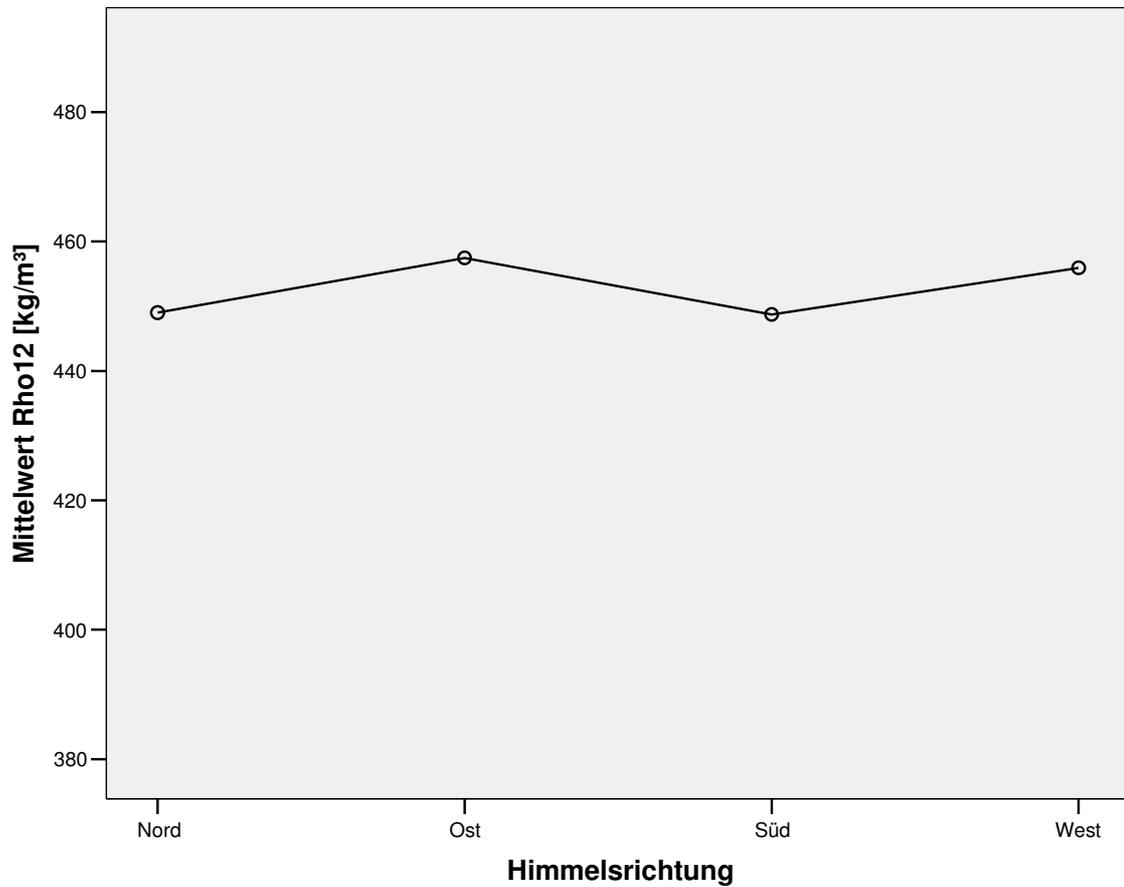


Abbildung 39: Fichte Nr. 67: Mittlere Rohdichte [rho12] über den vier Haupthimmelsrichtungen.

In Abbildung 39 ist der Verlauf der Rohdichtemittelwerte von Fichte Nr. 67 in den vier Haupthimmelsrichtungen dargestellt. Die Rohdichtemittelwerte der vier Himmelsrichtungen liegen sehr dicht beieinander, zwischen 448 und 460 [kg/m³].

Fichte Nr. 67

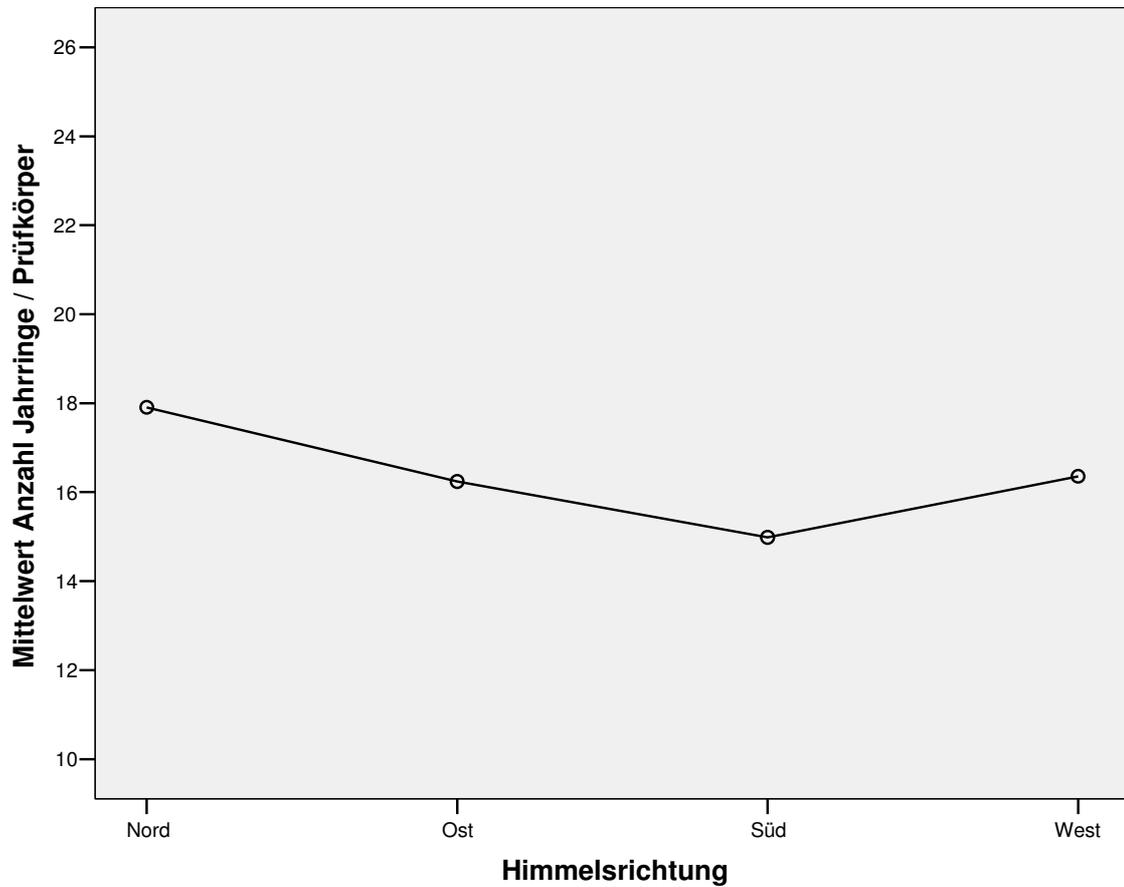


Abbildung 40: Fichte Nr. 67, mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 40 zeigt die mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in den Haupthimmelsrichtungen für die Fichte Nr. 67. Die mittlere Anzahl der Jahrringe pro Prüfkörper hat ihren niedrigsten Wert in der Südrichtung, wie bei Fichte Nr. 69 (Abb. 38).

Fichte Nr. 73

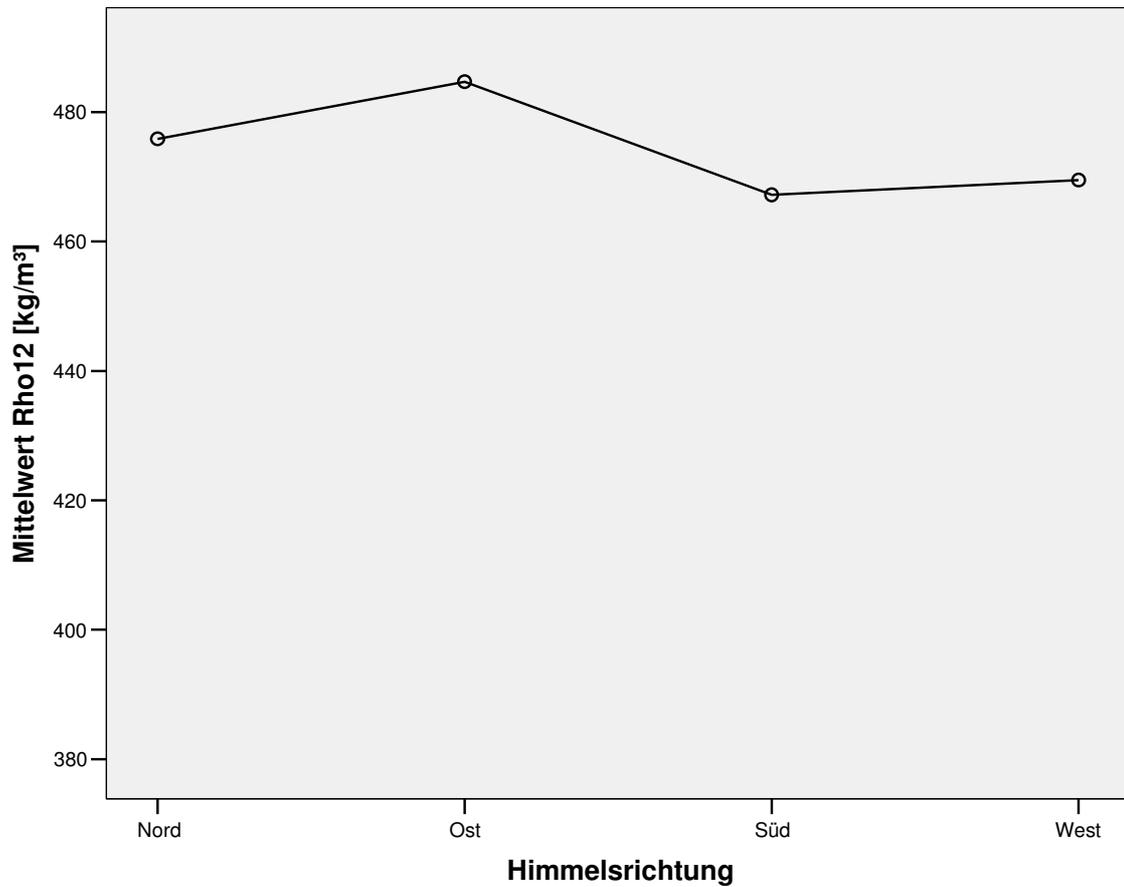


Abbildung 41: Fichte Nr. 73: Mittlere Rohdichte [rho12] über den vier Haupthimmelsrichtungen.

In Abbildung 41 ist der Verlauf der Rohdichtemittelwerte der Fichte Nr. 73 in den vier Haupthimmelsrichtungen dargestellt. Die Rohdichtemittelwerte der Himmelsrichtungen liegen sehr dicht beieinander mit leichtem Anstieg in der Osthimmelsrichtung. Alle Werte liegen über 465 [kg/m³] und z. T. über 470 [kg/m³].

Fichte Nr. 73

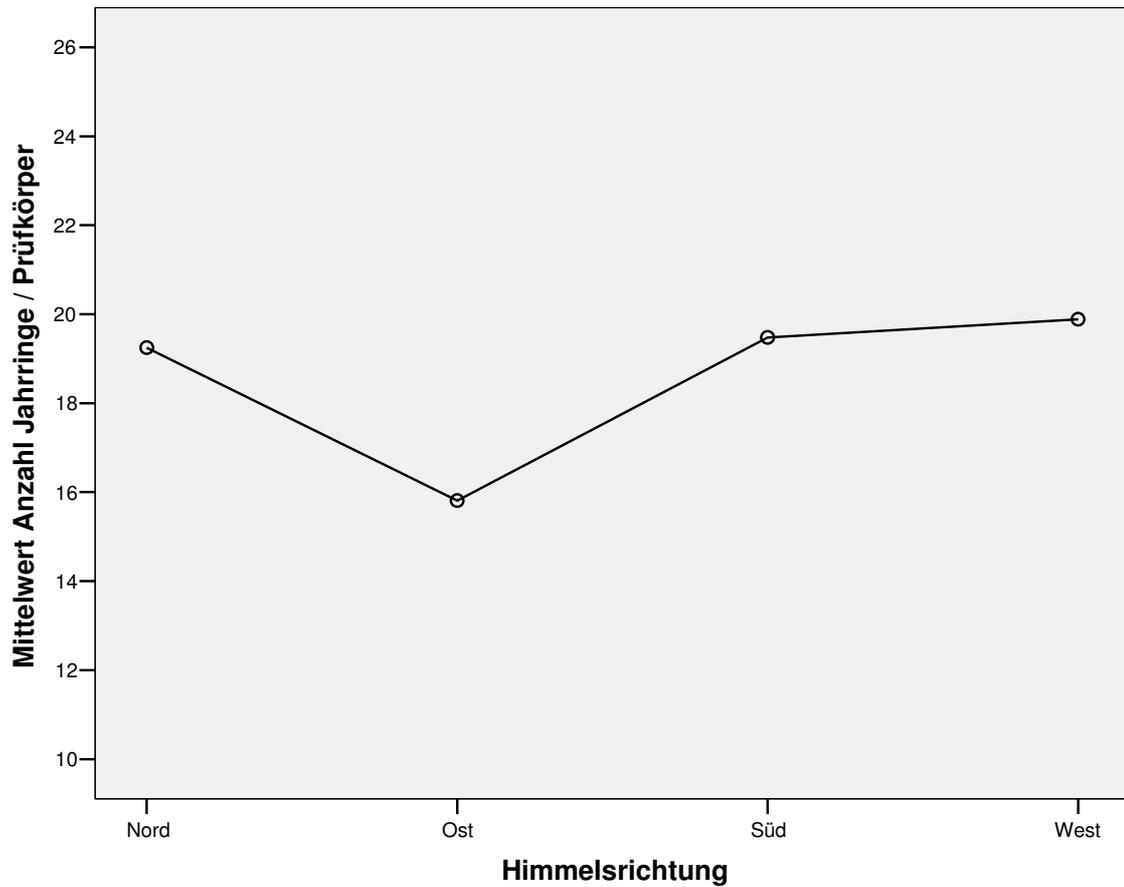


Abbildung 42: Fichte Nr. 73, mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 42 zeigt die mittlere Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper in den Haupthimmelsrichtungen für die Fichte Nr. 73. Die mittlere Anzahl der Jahrringe pro Prüfkörper hat ihren niedrigsten Wert in der Ostrichtung, d. h. dort sind die breitesten Jahrringe vorhanden. Wie Abbildung 41 zeigt, ist dort auch die höchste Rohdichte vorhanden.

4.4 Biegeprüfung nach DIN 52 186 - Fichte

Rohdichte an fehlerfreien Biegeproben (tangential)

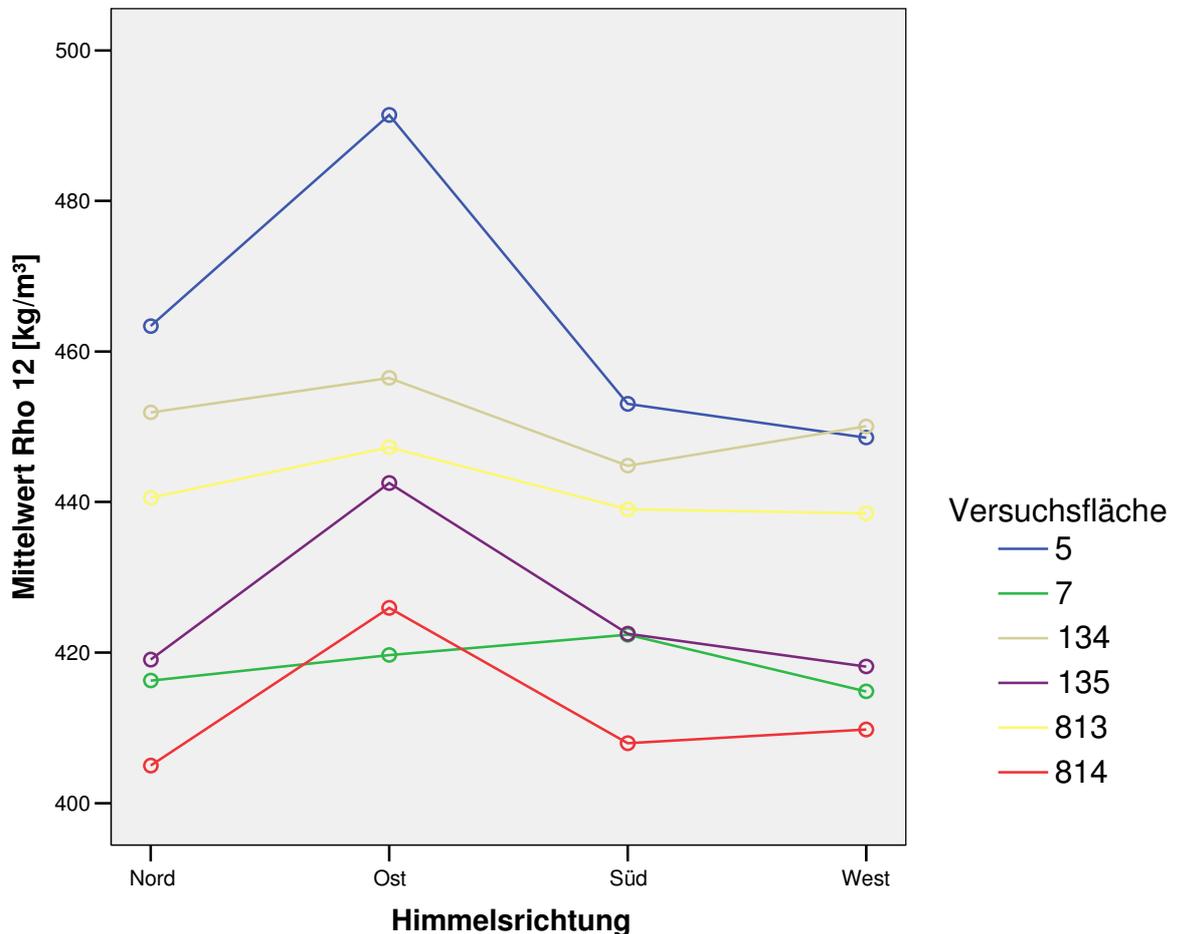


Abbildung 43: Sechs Versuchsflächen, mittlere Rohdichte [rho12] über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 43 zeigt die Mittelwerte der Rohdichte auf den verschiedenen Versuchsflächen über die Haupthimmelsrichtungen aufgetragen. Die Kurven der Versuchsflächen Denklingen 05, Zwiesel 135 und Schongau 814 zeigen einen ähnlichen Verlauf, auch wenn die jeweiligen Mittelwerte voneinander abweichen. Im Durchschnitt haben die Fichten auf der Versuchsfläche Denklingen 05 die höchste Rohdichte (> 450 [kg/mm³]). Die Mittelwerte Denklingen 05 liegen um den in der Literatur angegebenen Wert für die Fichte von 470 [kg/m³]. Im Gegensatz dazu liegen die Mittelwerte der anderen Versuchsflächen z. T. deutlich unter diesem Wert (z. B. Schongau 814).

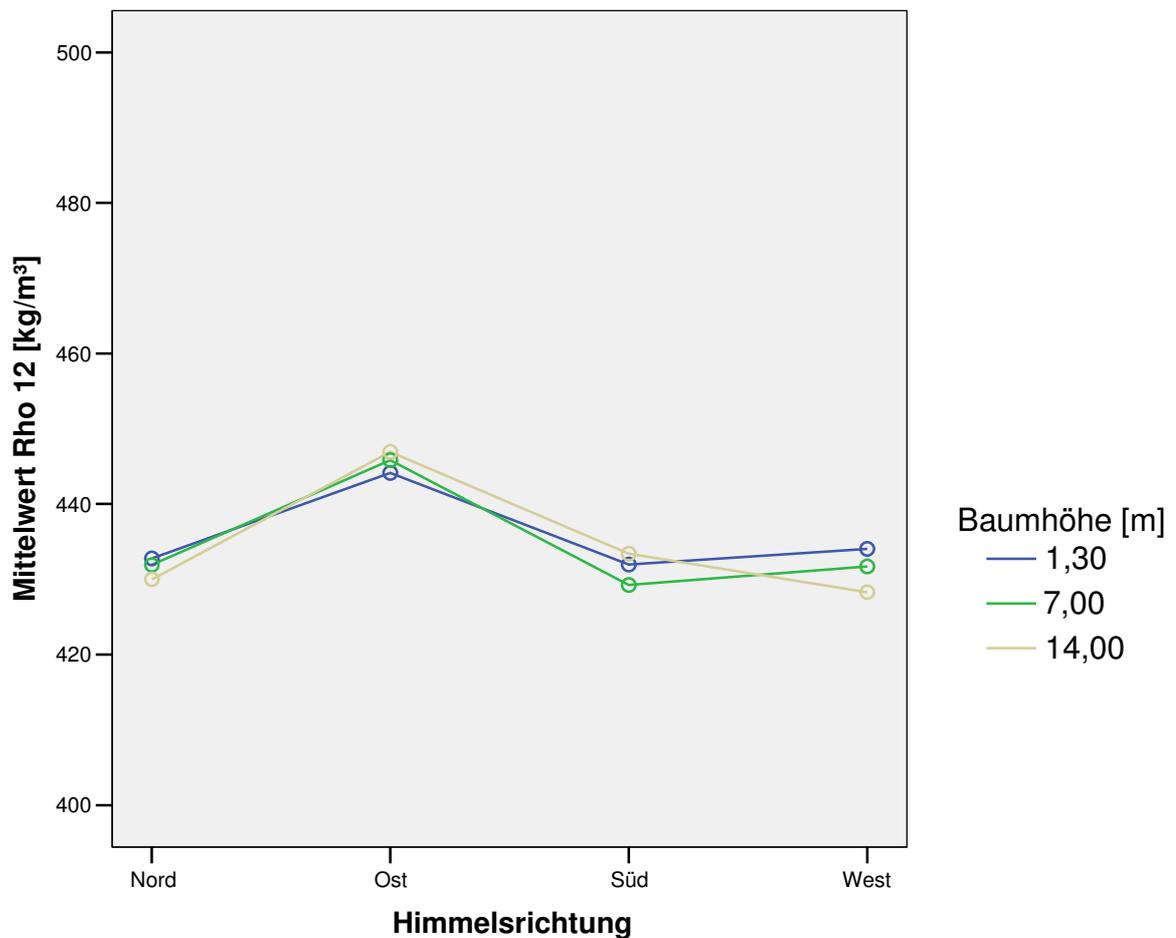


Abbildung 44: alle untersuchten Fichten, mittlere Rohdichte [rho12] in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 44 zeigt die mittlere Rohdichte [rho12] der drei untersuchten Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen aufgetragen für alle untersuchten Fichten. Sie zeigen im Osten einen höheren Rohdichtemittelwert, während die verbleibenden drei Haupthimmelsrichtungen in etwa auf dem gleichen Niveau liegen.

Tabelle 10: mittlere Rohdichte [ρ_{12}] in den Haupthimmelsrichtungen pro untersuchter Baumhöhe auf den Versuchsflächen und gemittelt pro Baumhöhe (gesamt).

Baumhöhe [m]	Versuchsfläche	Himmelsrichtung												Gruppen-Gesamtwert		
		Nord			Ost			Süd			West					
		Rho 12 [kg/m ³]														
[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]		
1,30	5	18	460	52	15	471	43	10	446	50	11	456	39	54	459	46
	7	29	414	42	27	423	38	22	422	53	22	414	57	100	418	47
	134	63	456	56	74	464	59	61	445	52	50	456	51	248	456	55
	135	17	426	32	21	438	36	24	429	40	20	419	59	82	428	43
	813	19	438	53	21	455	54	17	446	46	19	450	56	76	447	52
	814	57	408	42	64	423	52	44	411	51	43	413	50	208	414	49
	Gruppen-Gesamtwert	203	433	52	222	444	55	178	432	51	165	434	56	768	436	54
7,00	5	26	473	38	29	505	66	22	459	48	23	447	47	100	473	55
	7	26	412	50	27	417	56	19	421	50	20	409	52	92	414	52
	134	57	449	53	64	447	56	67	440	51	60	448	52	248	446	53
	135	14	421	41	19	451	52	15	419	53	15	419	38	63	429	48
	813	14	444	58	16	446	65	16	434	59	17	438	54	63	440	58
	814	52	403	49	59	427	52	39	401	50	38	412	49	188	412	51
	Gruppen-Gesamtwert	189	432	55	214	446	62	178	429	54	173	432	52	754	435	56
14,00	5	12	445	51	25	482	59	16	439	36	14	440	31	67	456	51
	7	18	425	39	19	420	29	15	425	40	18	423	45	70	423	38
	134	46	451	43	56	457	49	51	451	40	48	447	46	201	451	45
	135	11	406	35	12	437	41	10	413	52	9	414	37	42	418	42
	813	18	440	50	18	440	49	14	437	54	13	423	56	63	436	51
	814	36	403	48	40	429	54	32	412	43	29	402	44	137	413	49
	Gruppen-Gesamtwert	141	430	48	170	447	53	138	433	45	131	428	47	580	435	49

Tabelle 10 enthält die Mittelwerte der Rohdichte ρ_{12} in den drei untersuchten Baumhöhen für jede Versuchsfläche in den Haupthimmelsrichtungen sowie die durchschnittliche Rohdichte für jede Versuchsfläche in den untersuchten Baumhöhen (gesamt). Nur bei den Fichten der Versuchsfläche Denklingen 05 liegen die Werte in der Ostrichtung in allen drei Baumhöhen auf und über dem in der Literatur angegebenen Wert von 470 $[\text{kg}/\text{m}^3]$. In Baumhöhe 7 [m] liegt auch die Nordrichtung über dem Wert.

Biegefestigkeit nach DIN 52 186 [N/mm²]

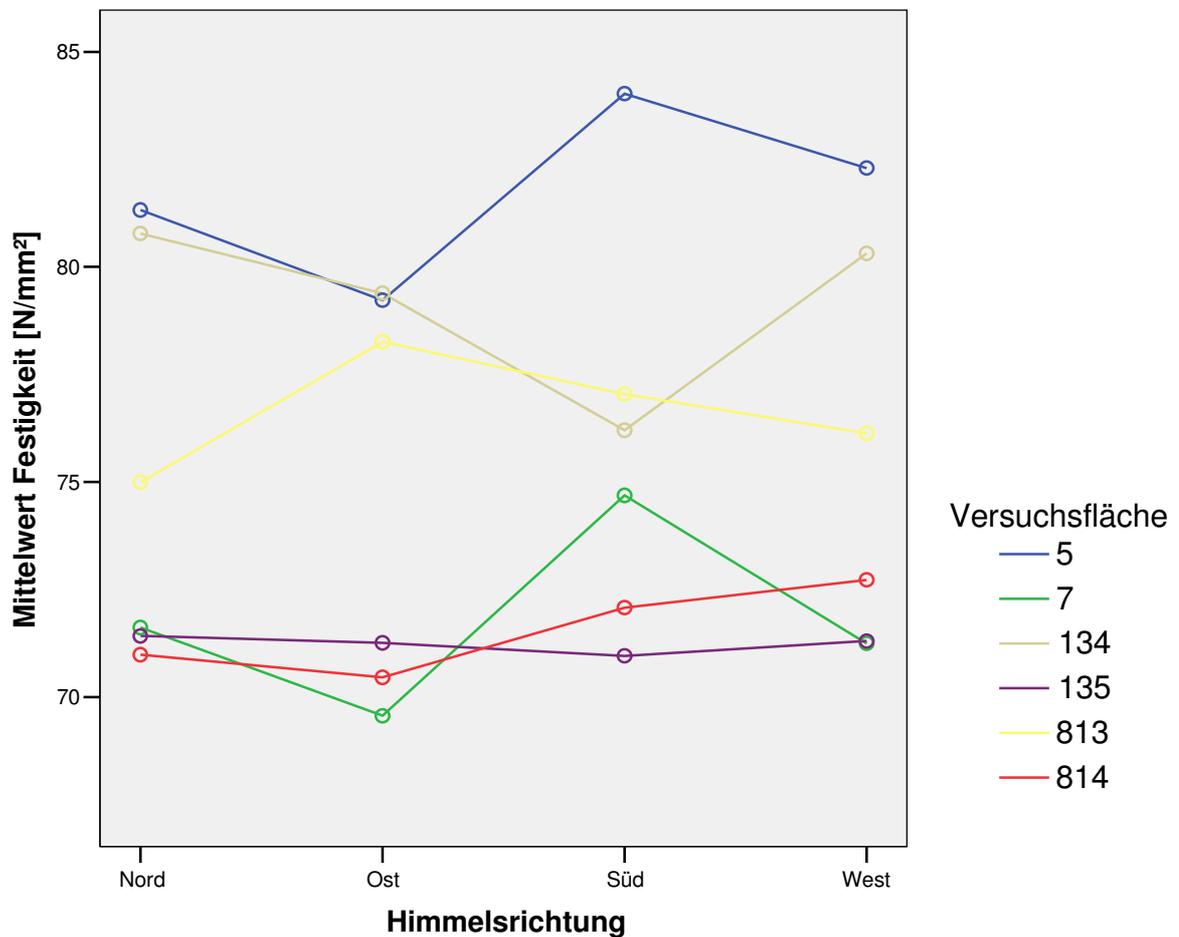


Abbildung 45: Sechs Versuchsflächen, mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 45 zeigt die Mittelwerte der Biegefestigkeit auf den sechs Versuchsflächen über die Haupthimmelsrichtungen. Die Kurven der Versuchsflächen Denklingen 05 und Höglwald (7) zeigen einen ähnlichen Verlauf, auch wenn die jeweiligen Mittelwerte voneinander abweichen. Die höchste Biegefestigkeit zeigen die Fichten auf der Versuchsfläche Denklingen 05 (> 80 [N/mm²]). Im Gegensatz hierzu sind die Mittelwerte der Versuchsflächen Zwiesel 135 und Schongau 814 am niedrigsten und dicht beieinander. Auf allen sechs Versuchsflächen liegen die Mittelwerte auffallend über dem Wert 70 [N/mm²] und damit über dem in der Literatur angegebenen Mittelwert von 68 [N/mm²].

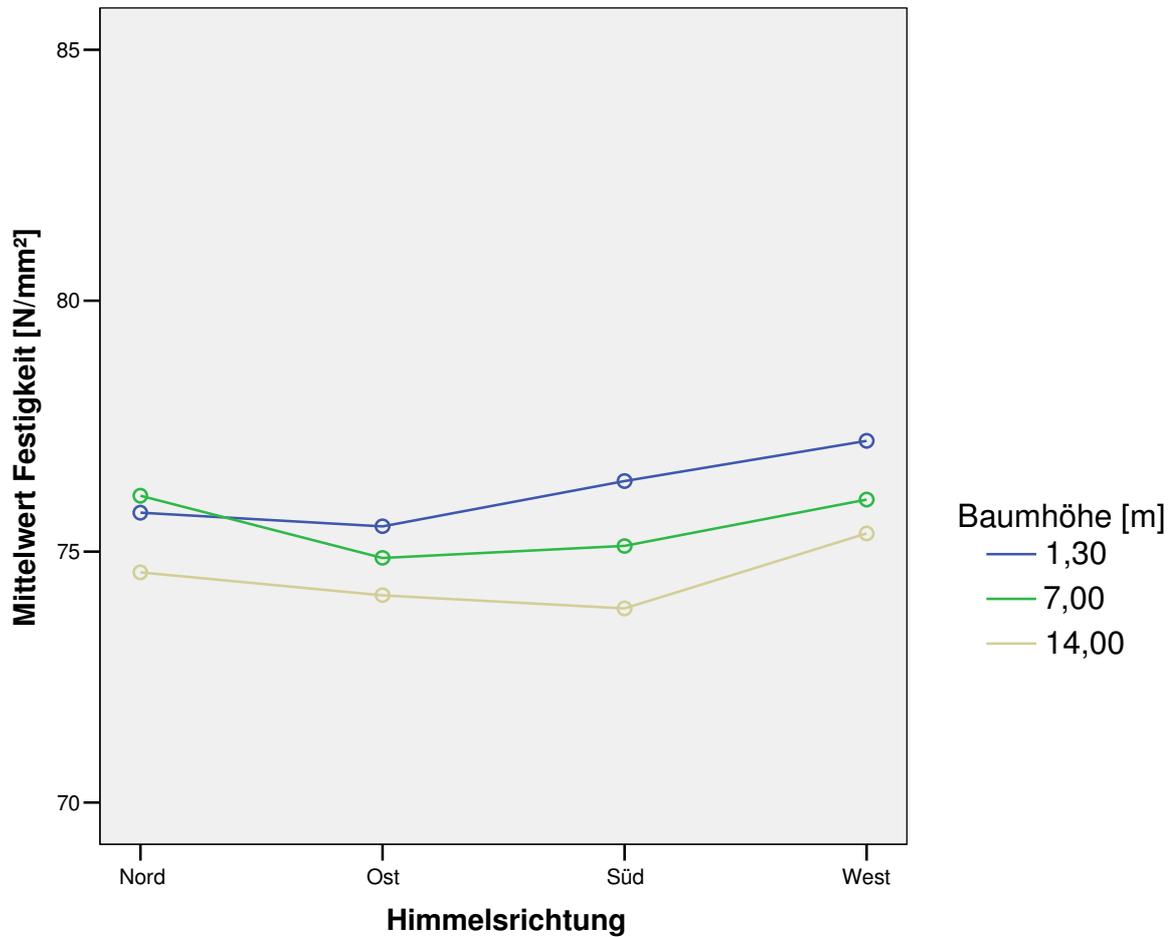


Abbildung 46: alle untersuchten Fichten - mittlere Biegefestigkeit in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 46 zeigt die mittlere Biegefestigkeit der drei untersuchten Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen für alle untersuchten Fichten. Die Biegefestigkeit nimmt mit zunehmender Baumhöhe leicht ab. Allerdings sind die Unterschiede in der Biegefestigkeit zwischen den Baumhöhen gering, da sie zwischen 74 und 77 [N/mm²] liegen. Die niedrigste Biegefestigkeit zeigt sich in 14 [m] Baumhöhe.

Tabelle 11: mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] in den Haupthimmelsrichtungen in 3 Baumhöhen auf den Versuchsflächen und gemittelt für alle Baumhöhen (gesamt).

		Himmelsrichtung												Gruppen-Gesamtwert		
		Nord			Ost			Süd			West					
		Festigkeit [N/mm ²]														
Baumhöhe [m]	Versuchsfläche	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]
1,30	5	18	78	13	15	76	15	10	81	17	11	85	14	54	79	14
	7	29	72	13	27	70	8	22	76	16	22	71	17	100	72	13
	134	63	82	16	74	80	14	61	76	12	50	82	10	248	80	13
	135	17	74	6	21	72	11	24	73	10	20	71	12	82	72	10
	813	19	76	14	21	82	11	17	82	16	19	78	15	76	80	14
	814	57	71	12	64	72	14	44	75	13	43	75	15	208	73	14
	Gruppen-Gesamtwert	203	76	14	222	76	13	178	76	13	165	77	14	768	76	14
7,00	5	26	84	11	29	83	17	22	84	11	23	81	12	100	83	13
	7	26	70	16	27	68	13	19	76	15	20	71	13	92	71	14
	134	57	80	15	64	79	14	67	76	13	60	79	14	248	78	14
	135	14	73	13	19	74	13	15	69	11	15	72	13	63	72	12
	813	14	75	17	16	78	16	16	73	15	17	75	13	63	75	15
	814	52	73	14	59	69	13	39	71	13	38	73	14	188	71	13
	Gruppen-Gesamtwert	189	76	15	214	75	15	178	75	13	173	76	14	754	76	14
14,00	5	12	79	13	25	75	14	16	81	9	14	80	9	67	78	12
	7	18	74	12	19	70	10	15	71	16	18	71	13	70	72	12
	134	46	81	12	56	80	11	51	76	10	48	81	11	201	79	11
	135	11	66	10	12	67	11	10	68	8	9	71	8	42	68	9
	813	18	74	10	18	74	14	14	75	13	13	74	13	63	74	12
	814	36	68	12	40	70	12	32	69	15	29	69	14	137	69	13
	Gruppen-Gesamtwert	141	75	13	170	74	13	138	74	12	131	75	13	580	74	13

Tabelle 11 enthält die Mittelwerte der Biegefestigkeit in den drei untersuchten Baumhöhen für jede Versuchsfläche in den Haupthimmelsrichtungen sowie die durchschnittliche Biegefestigkeit für jede Versuchsfläche in den untersuchten Baumhöhen (gesamt). Außer auf der Versuchsfläche Zwiesel 135 in 14 [m] Baumhöhe in der Nord- und Ostrichtung liegen alle anderen Werte über den Mittelwert von 68 [N/mm²], der für die Fichte in der Literatur angegeben wird.

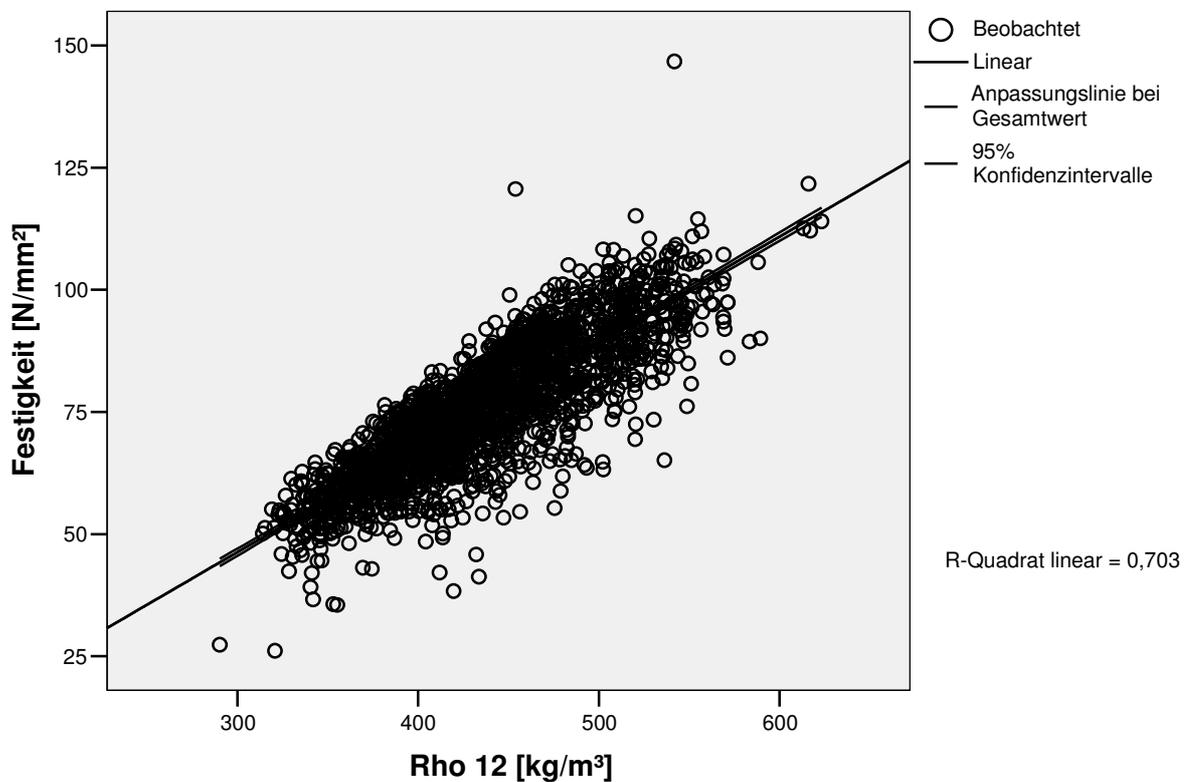


Abbildung 47: alle untersuchten Fichten - Streudiagramm Biegefestigkeit [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 12: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 47 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz.
	B	Standardfehler	Beta	
Rho 12 [kg/m ³]	0,215	0,003	0,839	0,000
(Konstante)	-18,209	1,334		0,000

Abbildung 47 zeigt den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Biegefestigkeit bei allen untersuchten Fichten. Das Bestimmtheitsmaß [R²] beträgt 0.703 und unterscheidet sich signifikant von 0,00. Der Anteil der Rohdichte an der Varianz der Streuung der Festigkeitswerte liegt bei 70%.

Tabelle 13: Das Bestimmtheitsmaß [R²] pro Versuchsfläche für den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Biegefestigkeit [N/mm²].

Versuchsfläche	Biegefestigkeit [N/mm ²]/Rohdichte [Rho12]	Signifikanz	N
	[R ²]		
Denklingen 05	0.54	0,00	237
Höglwald	0.68	0,00	262
Zwiesel 134	0.71	0,00	697
Zwiesel 135	0.71	0,00	187
Freising 813	0.78	0,00	202
Schongau 814	0.67	0,00	533

Tabelle 13 enthält von den verschiedenen Versuchsflächen die Bestimmtheitsmaße [R²], die den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Biegefestigkeit beschreiben. Es sind z. T. deutliche Unterschiede in den Bestimmtheitsmaßen der sechs Versuchsflächen zu erkennen. Das höchste Bestimmtheitsmaß zeigt die Versuchsfläche Freising 813 mit einem Wert von 0.78, das niedrigste zeigt Denklingen 05 mit einem Wert von 0.61. Generell ist festzustellen, dass der Einfluss der Rohdichte auf die Biegefestigkeit bei der Fichte vorhanden, aber unterschiedlich intensiv ist.

Biege- Elastizitäts-Modul nach DIN 52 186 [N/mm²]

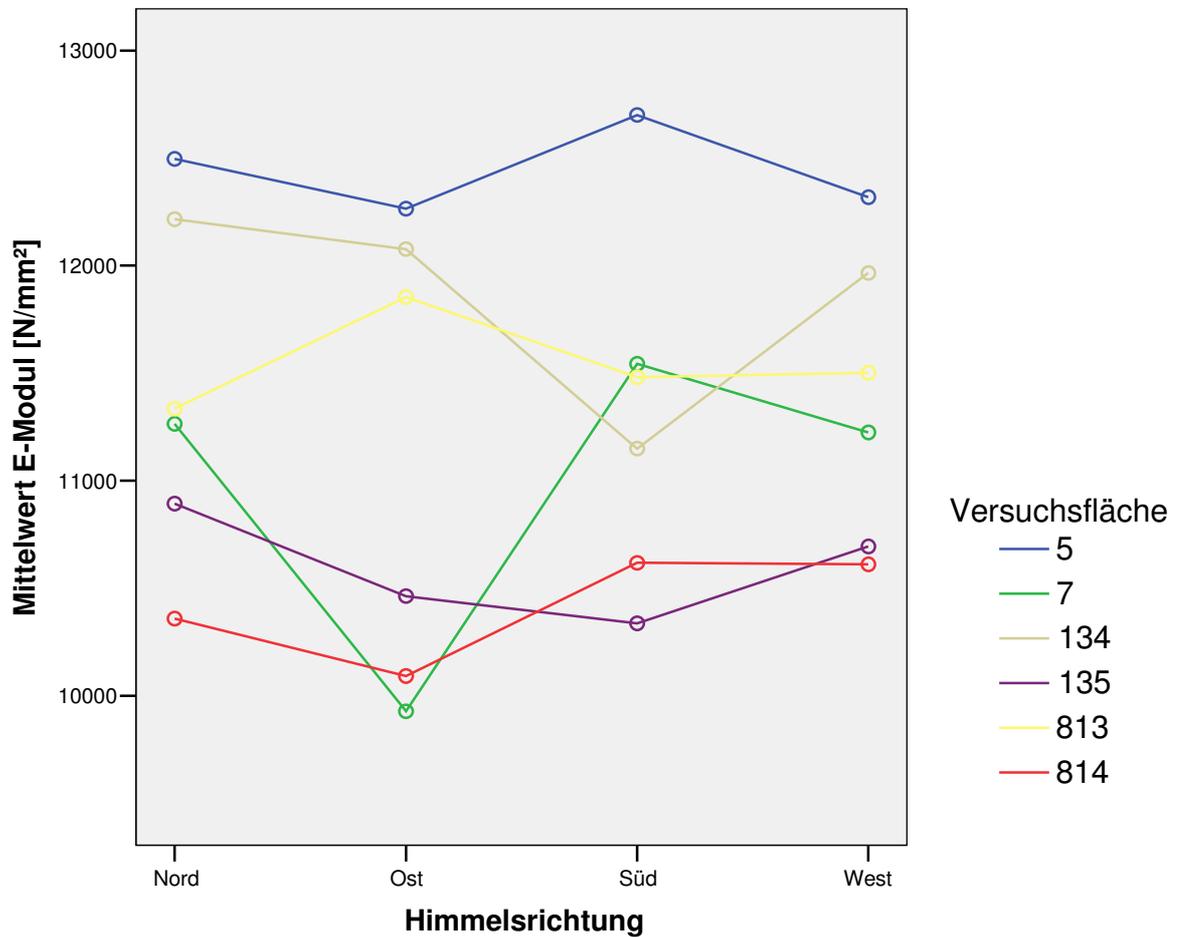


Abbildung 48: Sechs Versuchsflächen - mittlerer E-Modul [N/mm²] in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 48 zeigt die Mittelwerte des E-Modul auf den sechs verschiedenen Versuchsflächen über den vier Haupthimmelsrichtungen. Die Kurven der Versuchsflächen zeigen keinen ähnlichen Verlauf außer von Denklingen 05 (höchste Mittelwerte) und Schongau 814 (niedrigste Mittelwerte). Die Mittelwerte aller Versuchsflächen liegen über 10.000 [N/mm²], dem Literaturmittelwert.

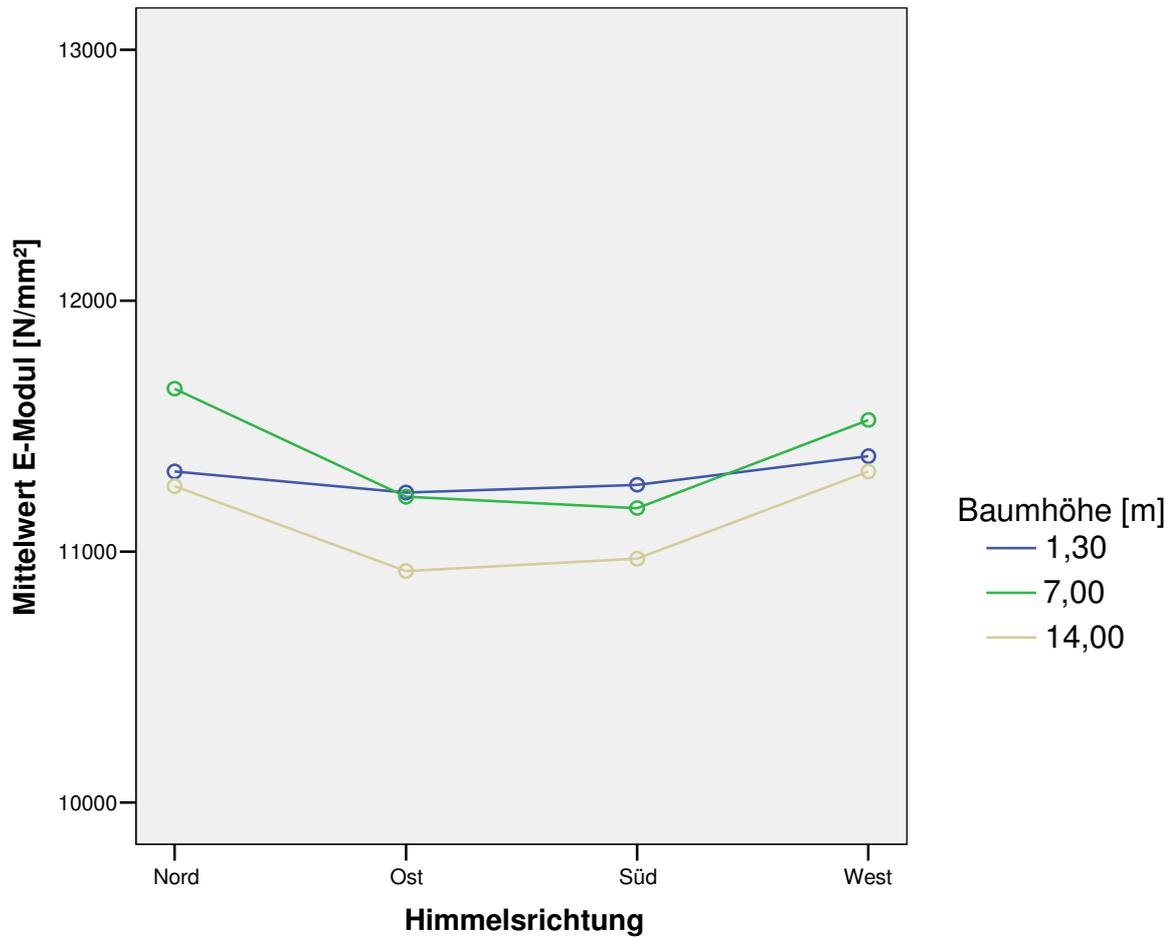


Abbildung 49: mittlerer E-Modul [N/mm²] in drei Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 49 zeigt den mittleren E-Modul in den drei untersuchten Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen für alle untersuchten Fichten. Der E-Modul erreicht in 7 [m] Baumhöhe in Nord- und Westrichtung seine höchsten Werte. Die niedrigsten E-Modulwerte zeigt die Baumhöhe 14 [m]. Alle Werte liegen zwischen 10900 und 11600 [N/mm²] in allen drei Baumhöhen und damit über dem Literaturmittelwert.

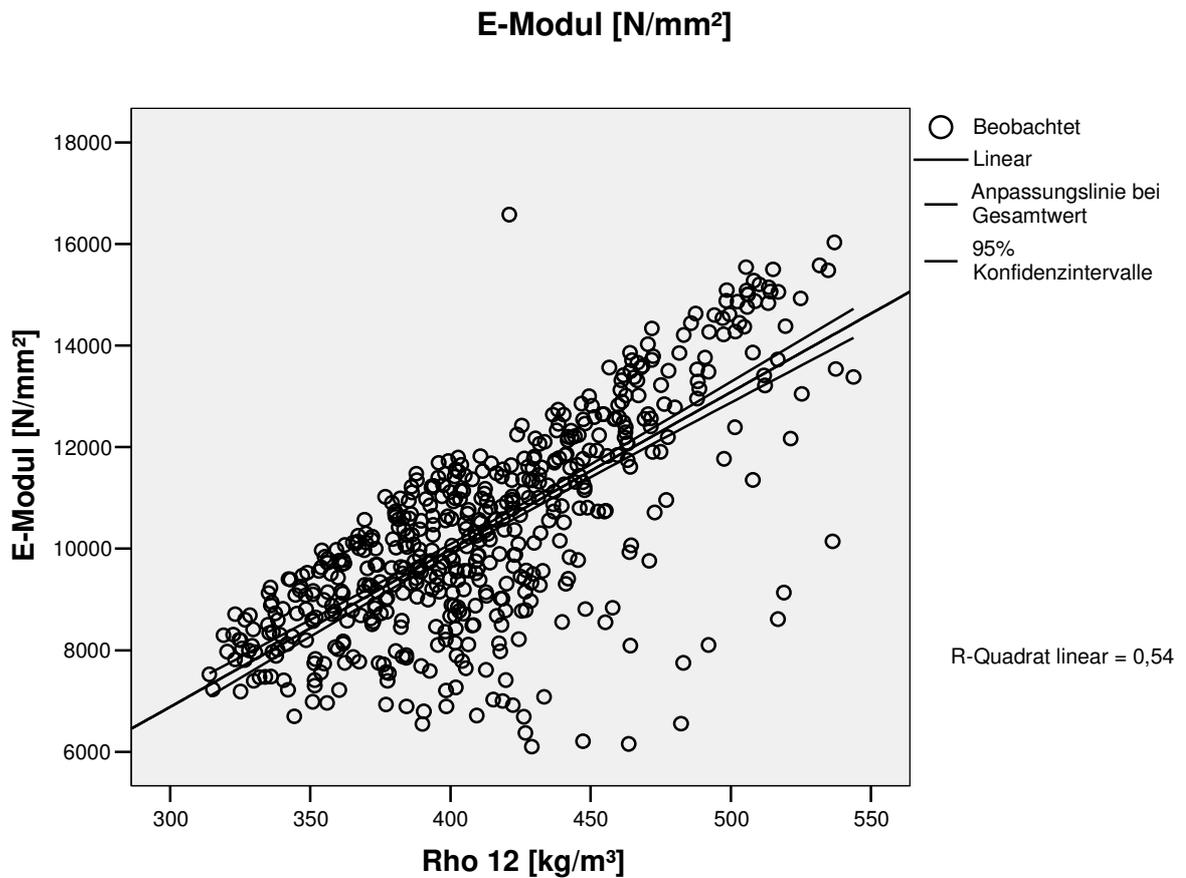


Abbildung 50: alle untersuchten Fichten – Streudiagramm E-Modul [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 14: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 50 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.
	B	Standardfehler	Beta	
Rho 12 [kg/m ³]	30,980	1,241	0,735	0,000
(Konstante)	-2410,257	516,235		0,000

In Abbildung 50 wird der Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den E-Modul von allen untersuchten Fichten dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß [R²] beträgt 0.54 und unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der E-Modulwerte zu 54% von der Rohdichte [rho12] beeinflusst wird. Die Biegefestigkeit wird zu 70% (Abb. 47) von der Rohdichte beeinflusst.

Tabelle 15: Bestimmtheitsmaß [R²] pro Versuchsfläche für den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den Biege-E-Modul [N/mm²].

Versuchsfläche	E-Modul [N/mm ²]/Rohdichte [Rho12]	Signifikanz	Anzahl [N]
	[R ²]		
Denklingen 05	0.55	0,00	237
Höglwald	0.62	0,00	262
Zwiesel 134	0.60	0,00	697
Zwiesel 135	0.47	0,00	187
Freising 813	0.78	0,00	202
Schongau 814	0.54	0,00	533

Tabelle 15 enthält von den sechs verschiedenen Versuchsflächen die Bestimmtheitsmaße [R²], die den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den E-Modul beschreiben. Es sind z. T. deutliche Unterschiede in den Bestimmtheitsmaßen zwischen den sechs Versuchsflächen zu erkennen. Das höchste Bestimmtheitsmaß [R²] zeigt sich auf der Versuchsfläche Freising 813 mit einem Wert von 0.78, das niedrigste zeigt Zwiesel 135 mit einem Wert von 0.47.

Tabelle 16: mittlerer Biege-E-Modul [N/mm²] in den Haupthimmelsrichtungen pro untersuchter Baumhöhe auf den Versuchsflächen und gemittelt für alle Baumhöhen (gesamt).

Baumhöhe	Versuchsfläche	Nord			Ost			Süd			West			Gruppen-Gesamtwert		
		Anzahl	Mittelwert	S	Anzahl	Mittelwert	S									
[m]	[-]	[N]	[N/mm ²]		[N]	[N/mm ²]										
1,30	5	18	11836	1854	15	11576	2289	10	12408	1936	11	12704	1179	54	12046	1891
	7	29	11052	2116	27	10079	1306	22	11528	2260	22	11147	2200	100	10915	2029
	134	63	12293	2344	74	12070	2193	61	11060	1974	50	11866	1781	248	11837	2143
	135	17	11298	994	21	10444	1234	24	11098	1722	20	10495	2112	82	10825	1610
	813	19	11194	2547	21	12374	1938	17	11971	2181	19	12030	2222	76	11903	2226
	814	57	10261	1833	64	10564	2063	44	10980	1812	43	10719	2399	208	10601	2030
Gesamt		203	11318	2198	222	11235	2128	178	11266	1975	165	11380	2154	768	11295	2115
7,00	5	26	12955	1454	29	12877	2742	22	12823	1918	23	12329	1776	100	12759	2049
	7	26	11243	2200	27	9777	1957	19	11657	2257	20	11185	2090	92	10885	2211
	134	57	12093	2349	64	12210	2246	67	11327	2162	60	12048	2141	248	11907	2238
	135	14	11395	1791	19	11447	2065	15	9523	1289	15	10860	2210	63	10838	1998
	813	14	11612	2675	16	11690	2743	16	10877	2736	17	11389	2289	63	11385	2566
	814	52	10790	1945	59	9787	2365	39	10501	2101	38	10724	1980	188	10402	2150
Gesamt		189	11649	2200	214	11219	2624	178	11173	2263	173	11524	2136	754	11386	2333
14,00	5	12	12456	1996	25	11838	2218	16	12043	1562	14	11852	1462	67	12001	1866
	7	18	11636	1668	19	9927	1585	15	11421	1808	18	11363	2106	70	11056	1894
	134	46	12261	1855	56	11933	1974	51	11025	1593	48	11967	1802	201	11786	1859
	135	11	9628	1993	12	8941	2473	10	9729	966	9	10858	1520	42	9719	1931
	813	18	11268	2154	18	11392	2498	14	11576	2039	13	10877	2358	63	11291	2234
	814	36	9890	2002	40	9788	2074	32	10262	1885	29	10302	2318	137	10034	2057
Gesamt		141	11260	2184	170	10922	2331	138	10971	1792	131	11319	2057	580	11106	2117

Tabelle 16 enthält die Mittelwerte des Biege-E-Modul in den drei untersuchten Baumhöhen für sechs Versuchsflächen in den vier Haupthimmelsrichtungen sowie den durchschnittlichen Biege-E-Modul (gesamt) für jede Versuchsfläche. Kein Mittelwert liegt deutlich unter 10 000 [N/mm²] dem Mittelwert Biege-E-Modul für die Fichte in der Literatur.

Einzelbaumweise Auswertung von Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-E-Modul: Min, Mittel, Max.

Anmerkung:

Von allen sechs untersuchten Versuchsflächen markieren die drei Fichten der einzelbaumweisen Auswertung den unteren, mittleren und oberen Bereich der Rohdichtewertestreuung von allen Fichten.

Die **Fichte Nr. 63** besitzt im Mittel die niedrigste Rohdichte von allen untersuchten Fichten.

Die **Fichte Nr. 67** besitzt im Mittel den Rohdichtemittelwert der am nächsten dem Mittelwert von allen untersuchten Fichten.

Die **Fichte Nr. 73** besitzt im Mittel die höchste Rohdichte von allen untersuchten Fichten.

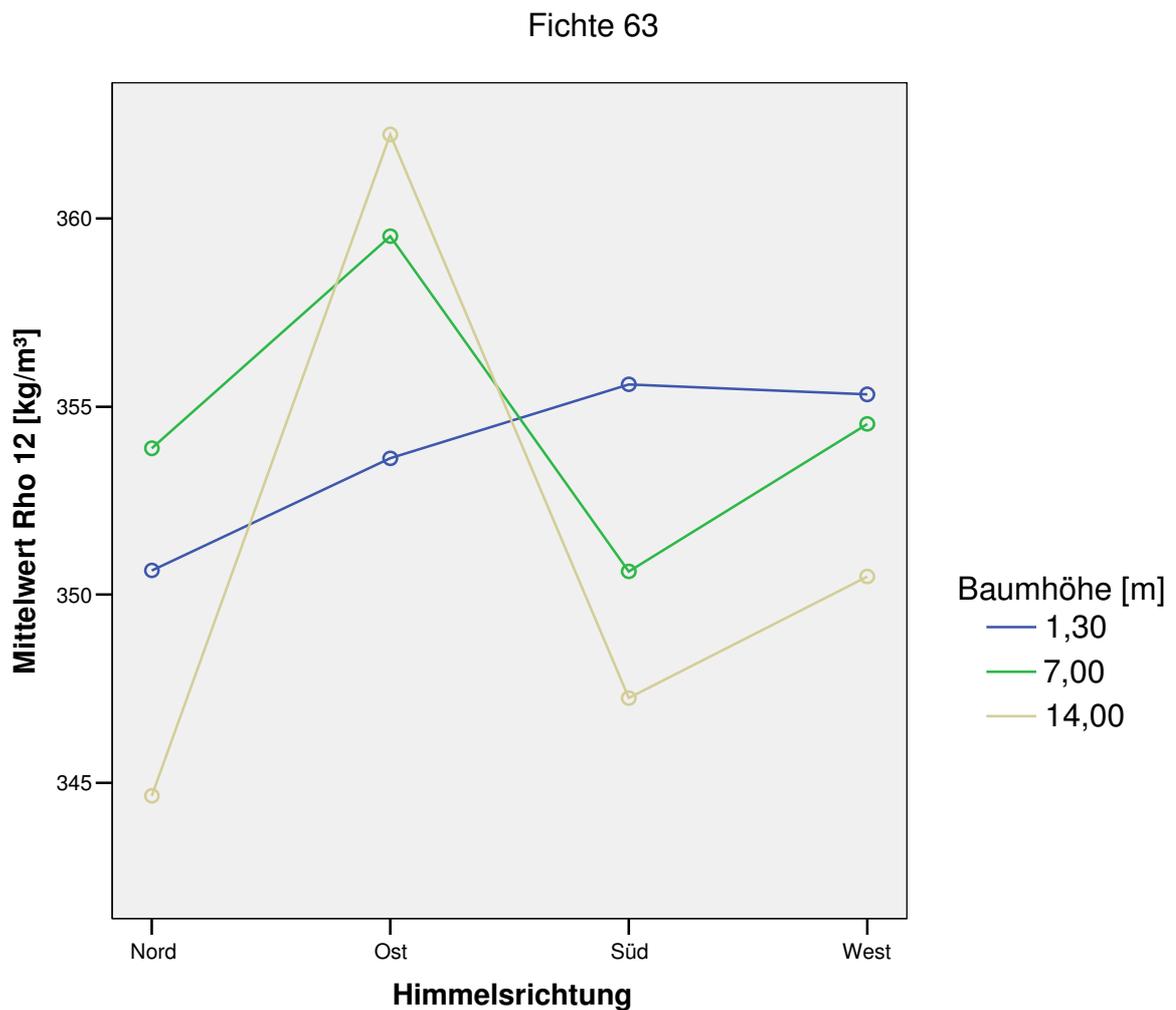


Abbildung 51: Fichte Nr. 63 - mittlere Rohdichte [rho12] in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

In Abbildung 51 ist der Verlauf der Rohdichtemittelwerte [rho12] in drei verschiedenen Baumhöhen der Fichte Nr. 63 in den Haupthimmelsrichtungen dargestellt. In Baumhöhe 1,3 [m] liegt der höchste Wert in der Süd-, in den beiden anderen Baumhöhen in der Ostrichtung. Die Rohdichtewerte liegen deutlich unter 370 [kg/m³].

Fichte 63

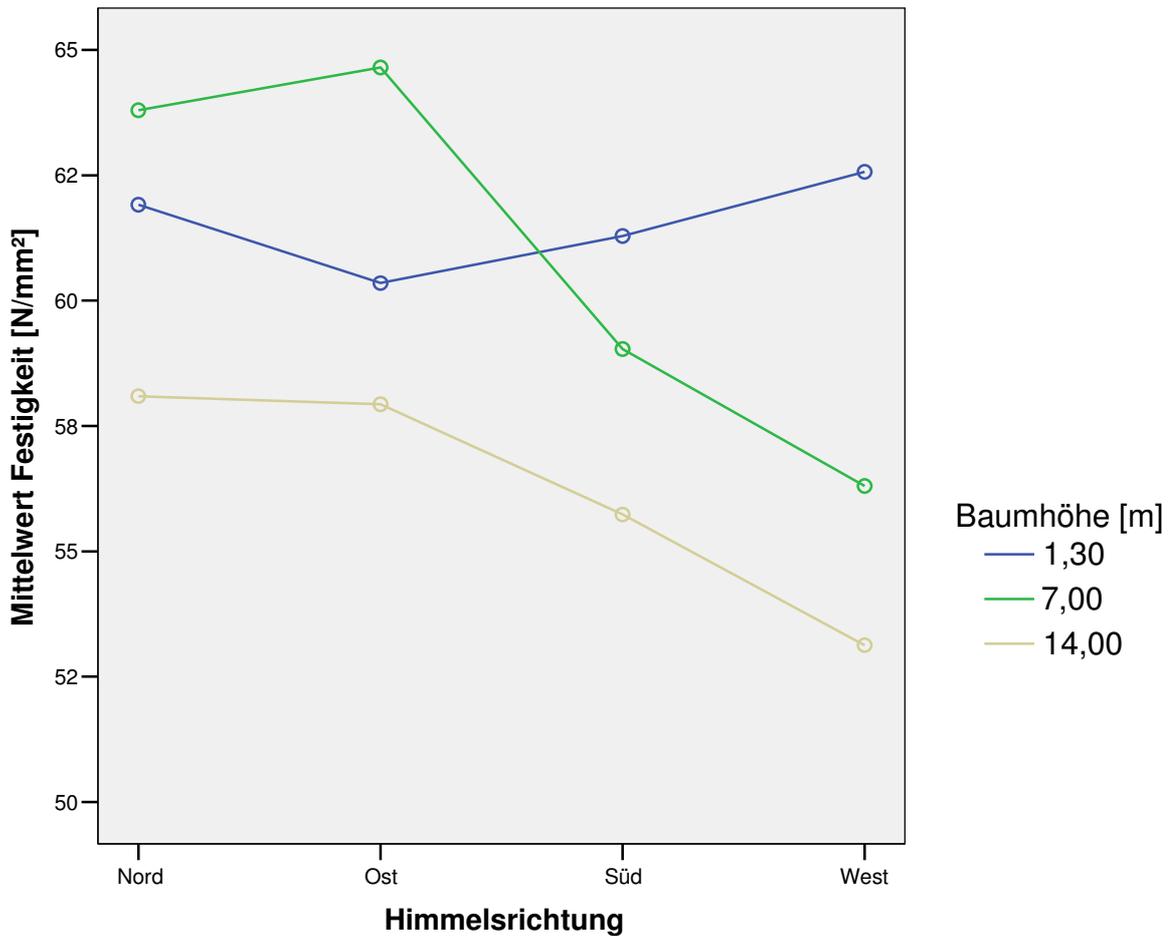


Abbildung 52: Fichte Nr. 63 - mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 52 zeigt den Verlauf der Biegefestigkeitsmittelwerte in drei untersuchten Baumhöhen der Fichte Nr. 63 in den vier Haupthimmelsrichtungen. Die niedrigste Biegefestigkeit zeigt sich in 14 [m] Stammhöhe. Alle Werte liegen unter 68 [N/mm²], dem Wert der in der Literatur als Mittelwert für die Fichte angegeben wird. Ähnlich wie bei der Rohdichte (s. Abb. 51) verläuft hier die Kurve für die Baumhöhe in 1,3 [m] abweichend von den beiden anderen Baumhöhen.

Fichte 63

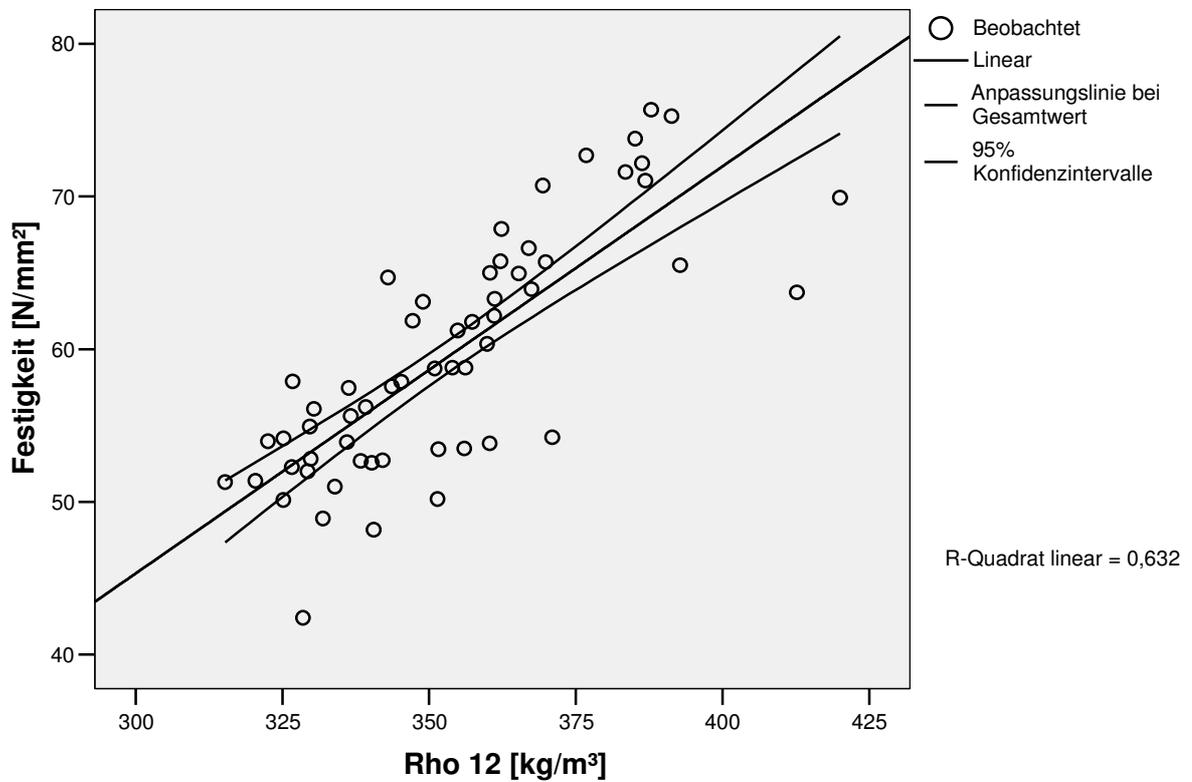


Abbildung 53: Fichte 63 – Streudiagramm Biegefestigkeit [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 17: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 53 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho 12 [kg/m ³]	0,267	0,027	0,795	0,000
(Konstante)	-34,640	9,621		0,001

Abbildung 53 zeigt den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Festigkeit bei der Fichte Nr. 63. Das Bestimmtheitsmaß [R²] beträgt 0.63 und unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der Festigkeitswerte wird zu 63% von der Rohdichte [rho12] beeinflusst.

Fichte 63

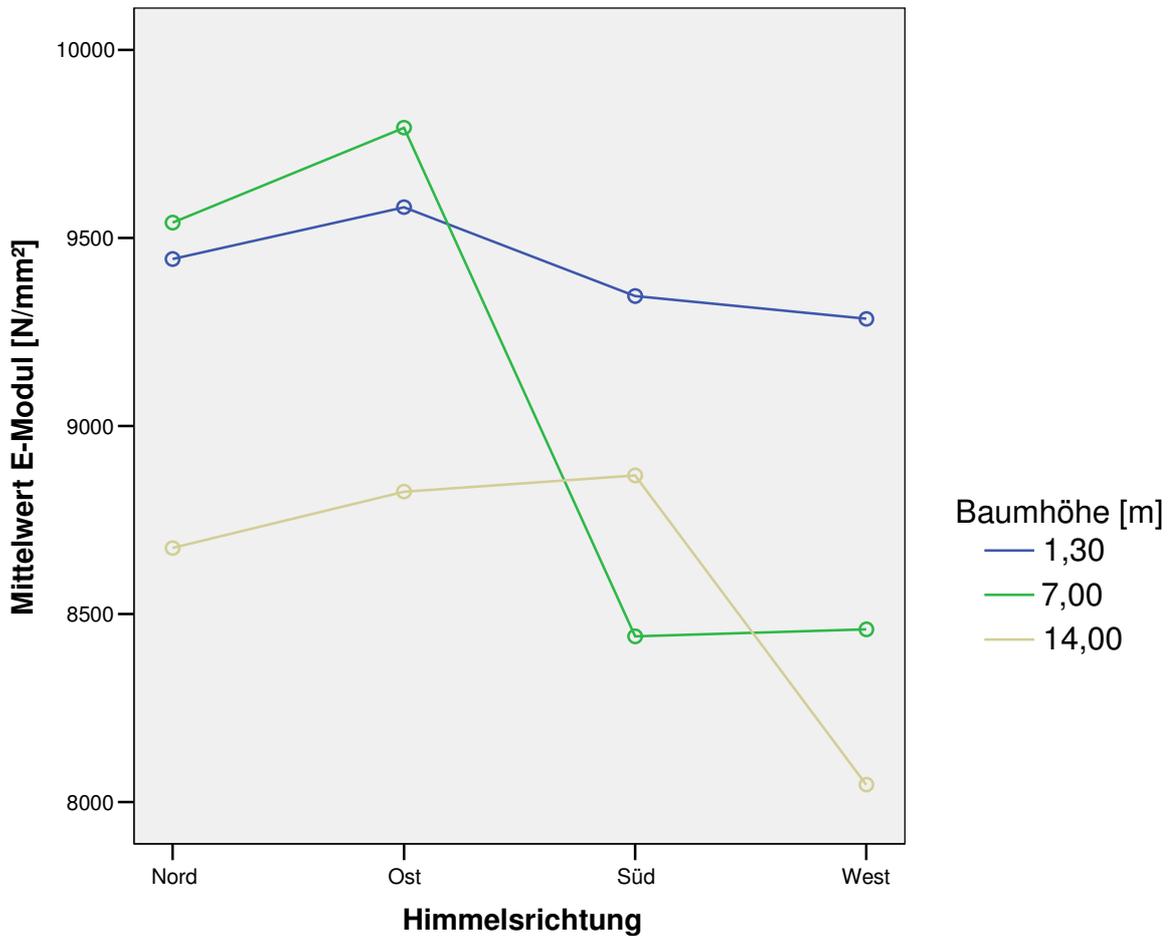


Abbildung 54: Fichte Nr. 63 - mittlerer E-Modul [N/mm²] in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 54 zeigt den Verlauf der E-Modul-Mittelwerte in drei verschiedenen Baumhöhen der Fichte Nr. 63 über vier Haupthimmelsrichtungen. In allen drei untersuchten Baumhöhen verlaufen die Kurven sehr unterschiedlich voneinander außer, dass der E-Modul im Westen bei allen Baumhöhen die niedrigsten Werte annimmt. Insgesamt liegen alle Werte unter 10 000 [N/mm²] (Literaturmittelwert).

Fichte 63

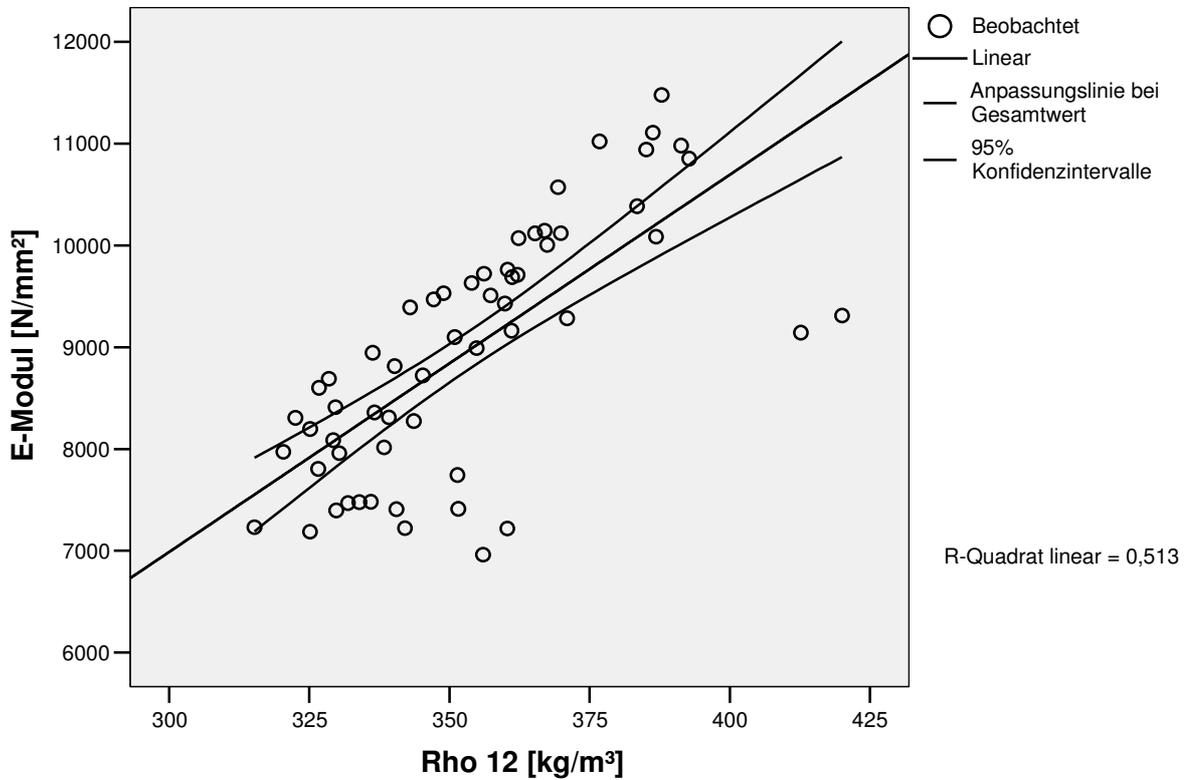


Abbildung 55: Fichte 63 – Streudiagramm E-Modul [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 18: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 55 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho 12 [kg/m ³]	37,056	4,826	0,716	0,000
(Konstante)	-4128,935	1709,878		0,019

In Abbildung 55 wird der Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den E-Modul der Fichte Nr. 63 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß [R²] beträgt 0.513 und unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der Festigkeitswerte wird demnach zu 51% von der Rohdichte beeinflusst. Die Biegefestigkeit wird zu 63% von der Rohdichte beeinflusst (s. Abb. 53).

Fichte 67

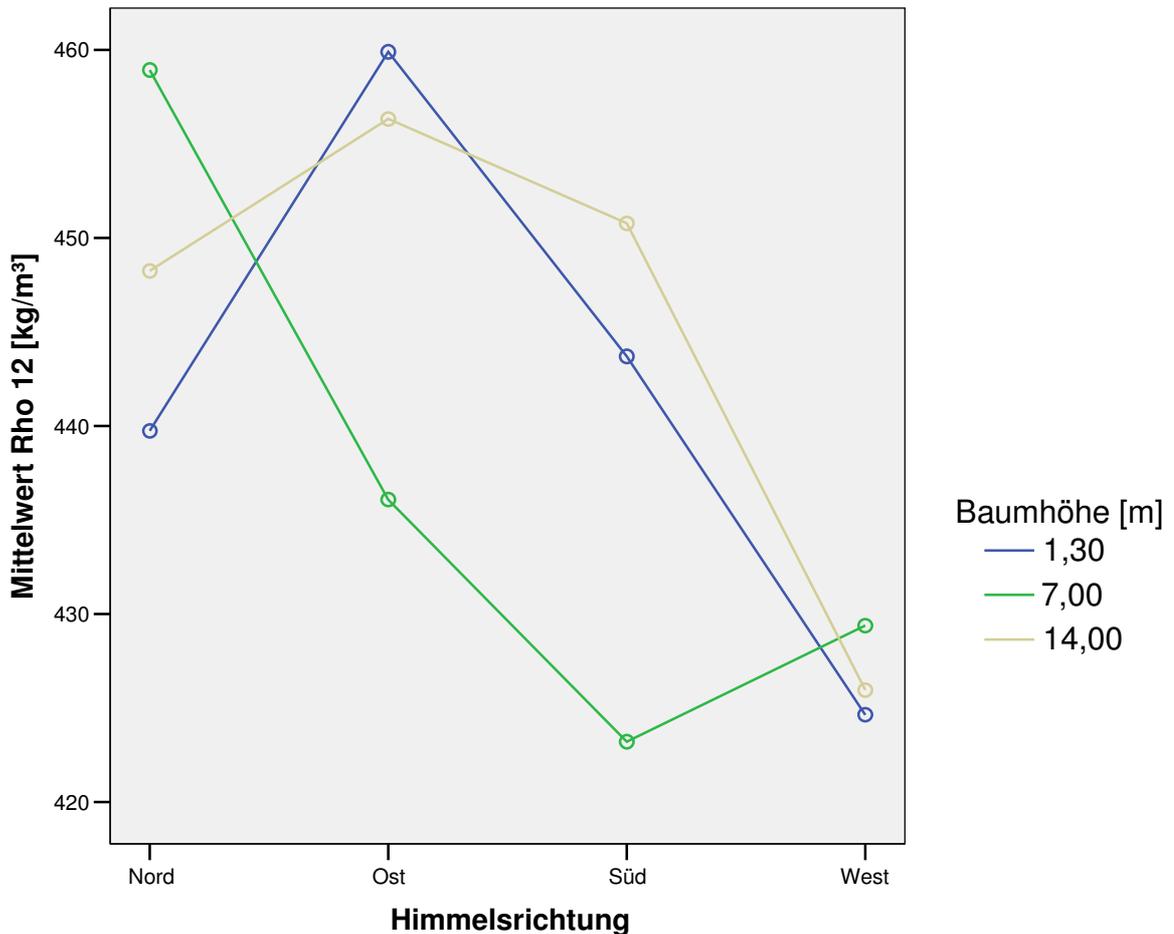


Abbildung 56: Fichte Nr. 67 – mittlere Rohdichte [rho 12] in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 56 zeigt den Verlauf der Rohdichtemittelwerte [rho12] in drei verschiedenen Baumhöhen der Fichte Nr. 67 in den Haupthimmelsrichtungen. Der Verlauf der Kurve in 7 [m] Baumhöhe weicht deutlich von den anderen beiden Baumhöhen ab. Dort ist ein deutlich höherer Wert in der Nordrichtung, wogegen in den drei anderen Himmelsrichtungen deutlich niedrigere Werte sind. In den Baumhöhen 1,3 [m] und 14 [m] sind die höchsten Rohdichtemittelwerte in der Ostrichtung und die deutlich niedrigsten genau gegenüber in der Westrichtung vorhanden. Die Mittelwerte liegen alle unter 470 [kg/m³] (Literaturmittelwert).

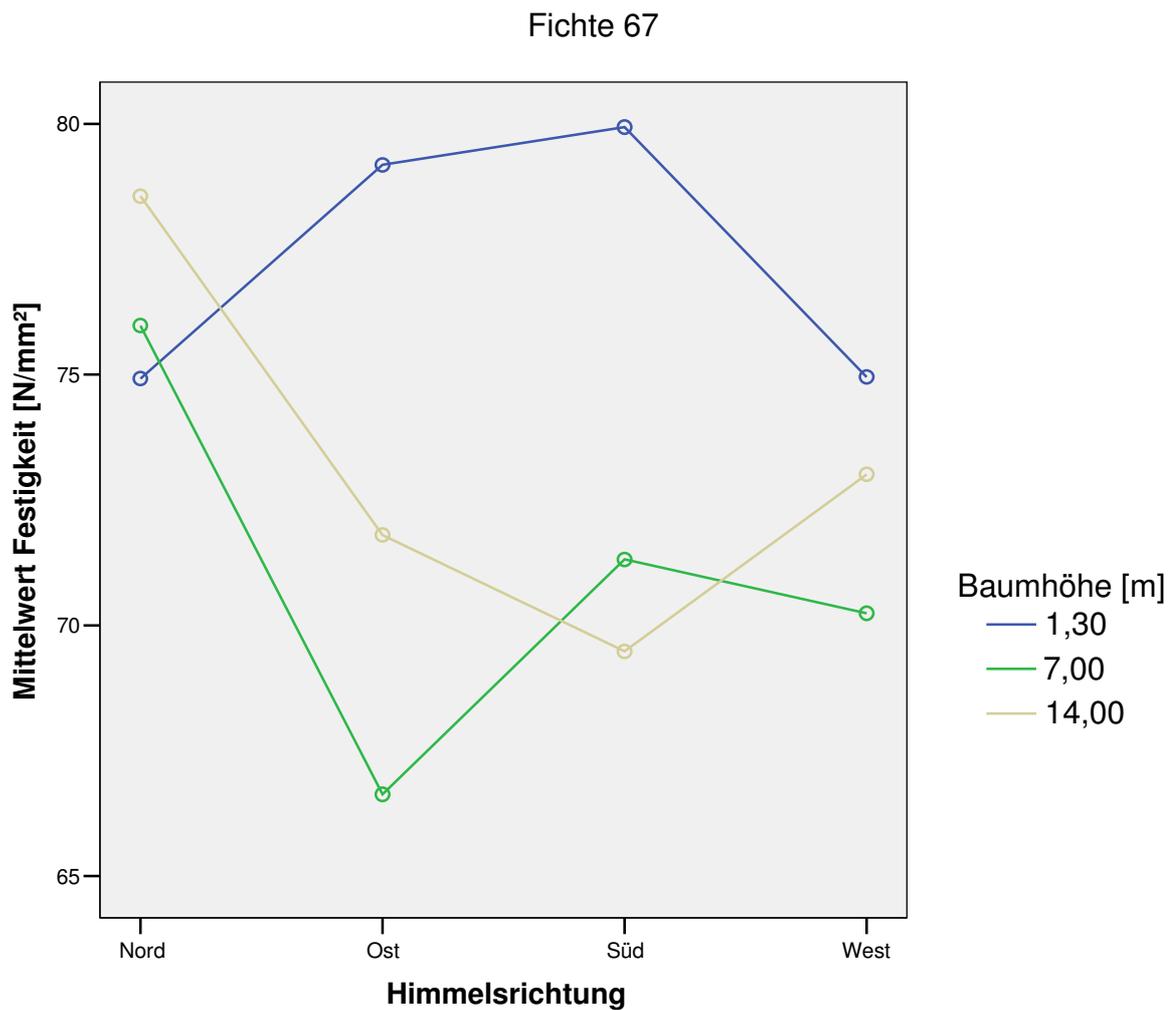


Abbildung 57: Fichte Nr. 67 - mittlere Biegefestigkeit in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 57 zeigt den Verlauf der Biegefestigkeitsmittelwerte in drei verschiedenen Baumhöhen der Fichte Nr. 67 in den vier Haupthimmelsrichtungen. Die höchsten Biegefestigkeiten zeigt die Stammhöhe 1.3 [m]. Alle drei Kurven unterscheiden sich deutlich in ihrem Verlauf. Außer dem Wert in Ostrichtung in 7 [m] Baumhöhe liegen alle anderen Werte über dem in der Literatur für die Fichte angegebenen Mittelwert von 68 [N/mm²].

Fichte 67

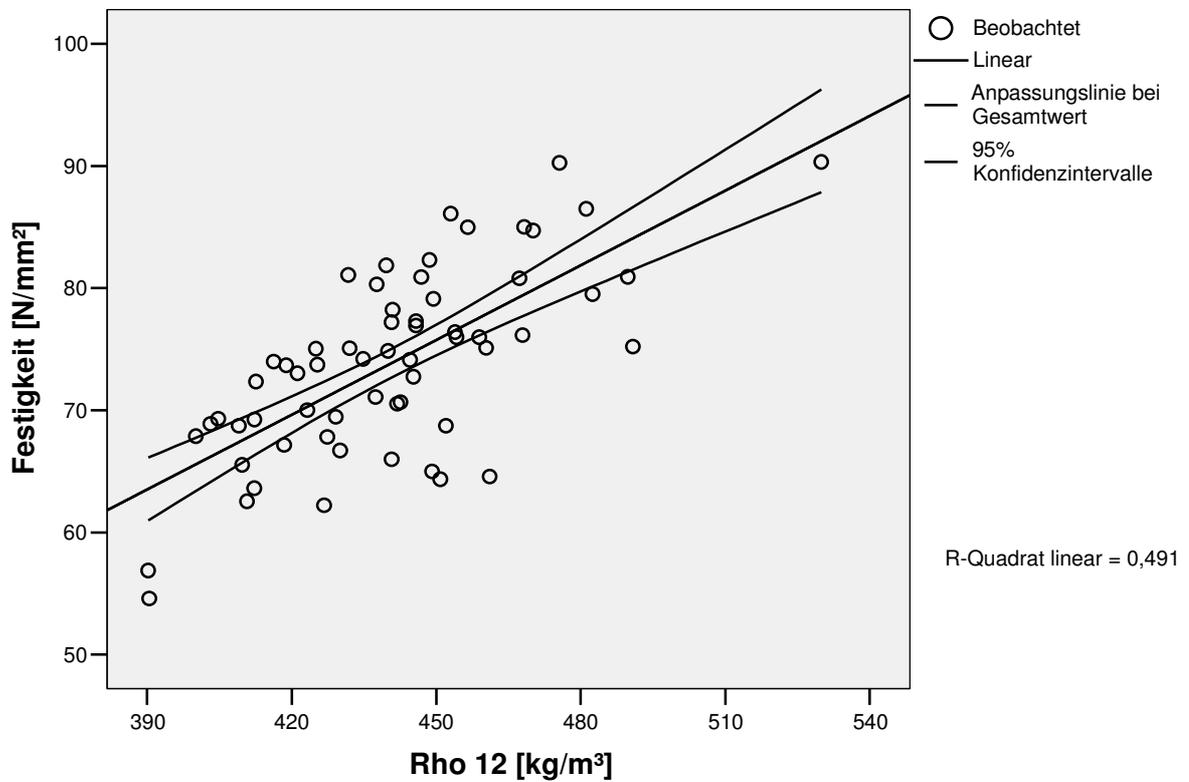


Abbildung 58: Fichte 67 – Streudiagramm Biegefestigkeit [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 19: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 58 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho 12 [kg/m ³]	0,204	0,027	0,700	0,000
(Konstante)	-16,015	11,941		0,185

Abbildung 58 zeigt den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Festigkeit bei der Fichte Nr. 67. Das Bestimmtheitsmaß [R²] beträgt 0.491 und unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der Festigkeitswerte zu 49%, d. h. zur Hälfte, von der Rohdichte beeinflusst wird.

Fichte 67

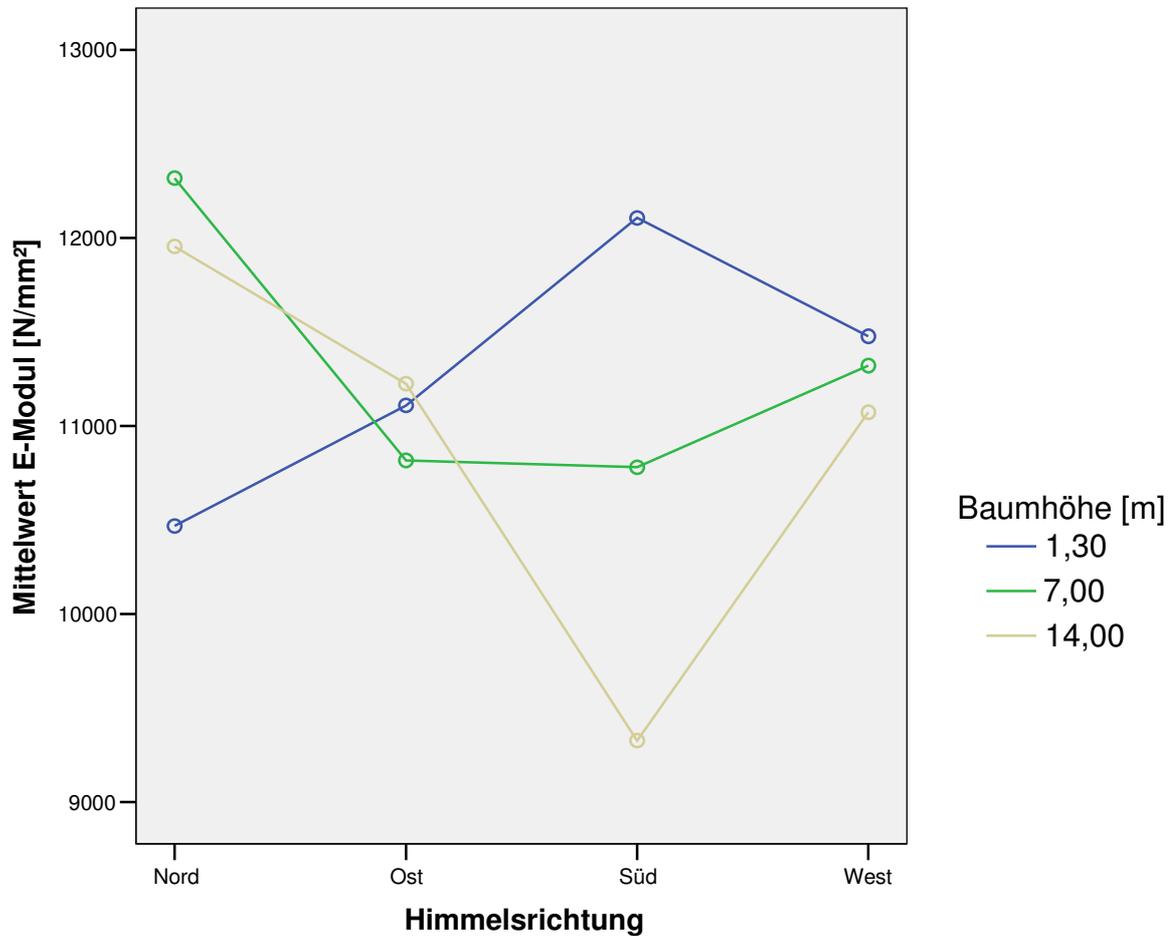


Abbildung 59: Fichte Nr. 67 - mittlerer E-Modul in drei Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 59 zeigt den Verlauf der E-Modul-Mittelwerte in drei verschiedenen Baumhöhen der Fichte Nr. 67 über die Haupthimmelsrichtungen aufgetragen. Einen deutlich niedrigen E-Modulwert zeigt die Südrichtung in 14 [m] Stammhöhe im Vergleich zu den anderen drei Himmelsrichtungen, die alle über 10 000 [N/mm²] (= Mittelwert für die Fichte in der Literatur) liegen. Die drei Kurven unterscheiden sich deutlich in ihren Verläufen zueinander.

Fichte 67

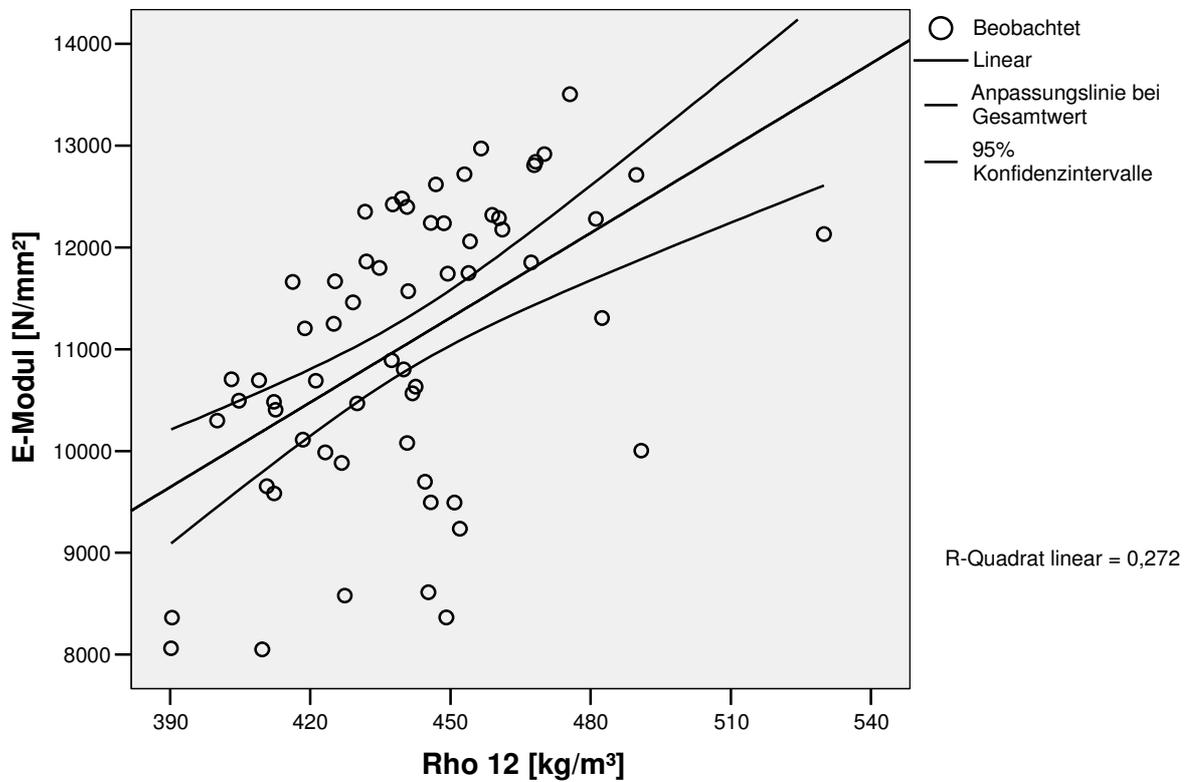


Abbildung 60: Fichte 67 – Streudiagramm E-Modul [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 20: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 60 sowie das Signifikanzniveau

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho 12 [kg/m ³]	27,740	5,904	0,522	0,000
(Konstante)	-1173,972	2605,892		0,654

In Abbildung 60 wird der Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den E-Modul der Fichte Nr. 67, dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß [R²] beträgt 0.272 und unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der Festigkeitswerte wird nur gering zu 22% von der Rohdichte, dagegen die Biegefestigkeit zu 49% (s. Abb. 58) beeinflusst.

Fichte 73

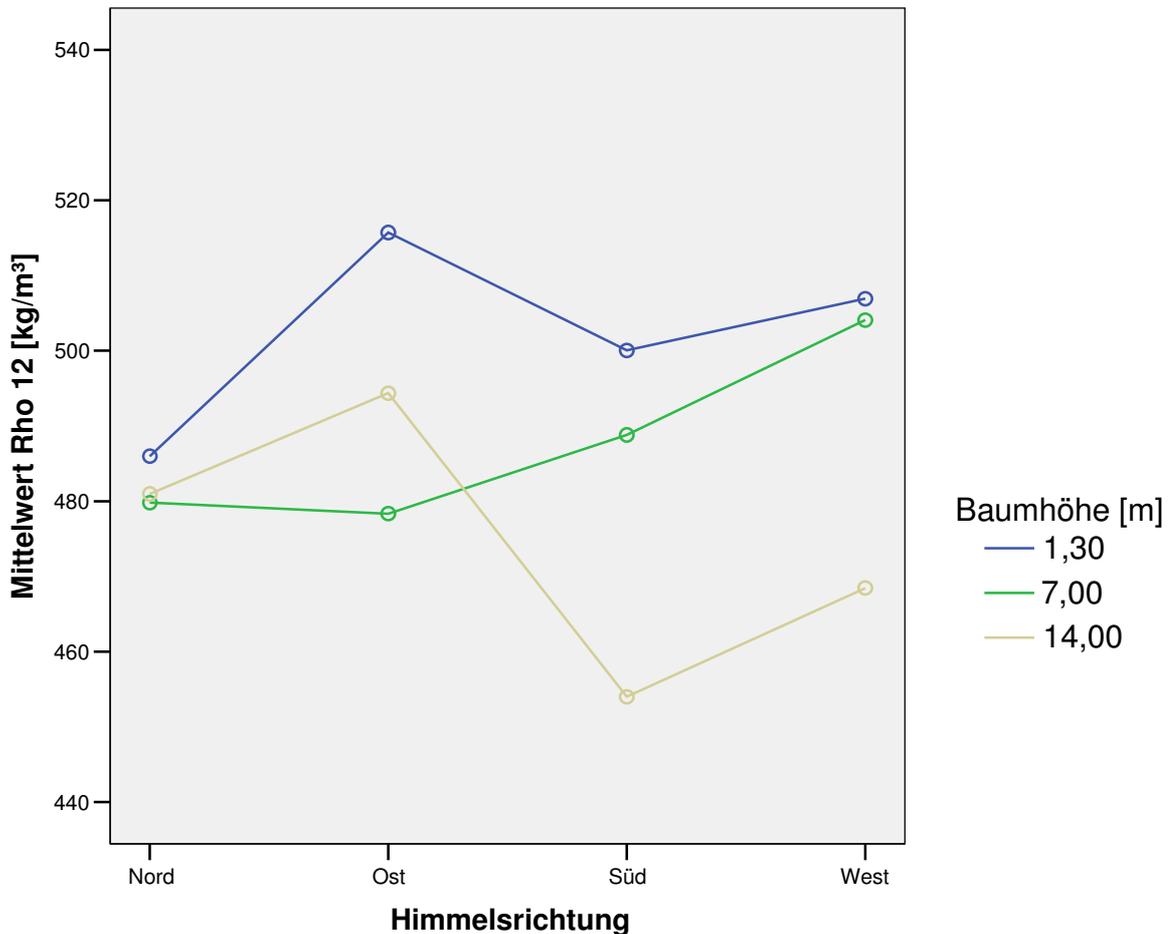


Abbildung 61: Fichte Nr. 73 – mittlere Rohdichte [N/mm²] in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

In Abbildung 61 ist der Verlauf der Rohdichtemittelwerte [ρ_{12}] in drei verschiedenen Baumhöhen der Fichte Nr. 73 in den Haupthimmelsrichtungen dargestellt. Die Mittelwerte liegen in der Nordrichtung dicht beieinander, weichen allerdings in den anderen Himmelsrichtungen stark voneinander ab. In 1,3 [m] Baumhöhe findet sich die höchste mittlere Rohdichte. Die niedrigsten Werte, die unterhalb von 470 [kg/m³] liegen (= Mittelwert für die Fichte laut Literatur bei einer Holzfeuchte von $u = 12\%$) sind in 14 [m] Baumhöhe in Süd- und Westrichtung.

Fichte 73

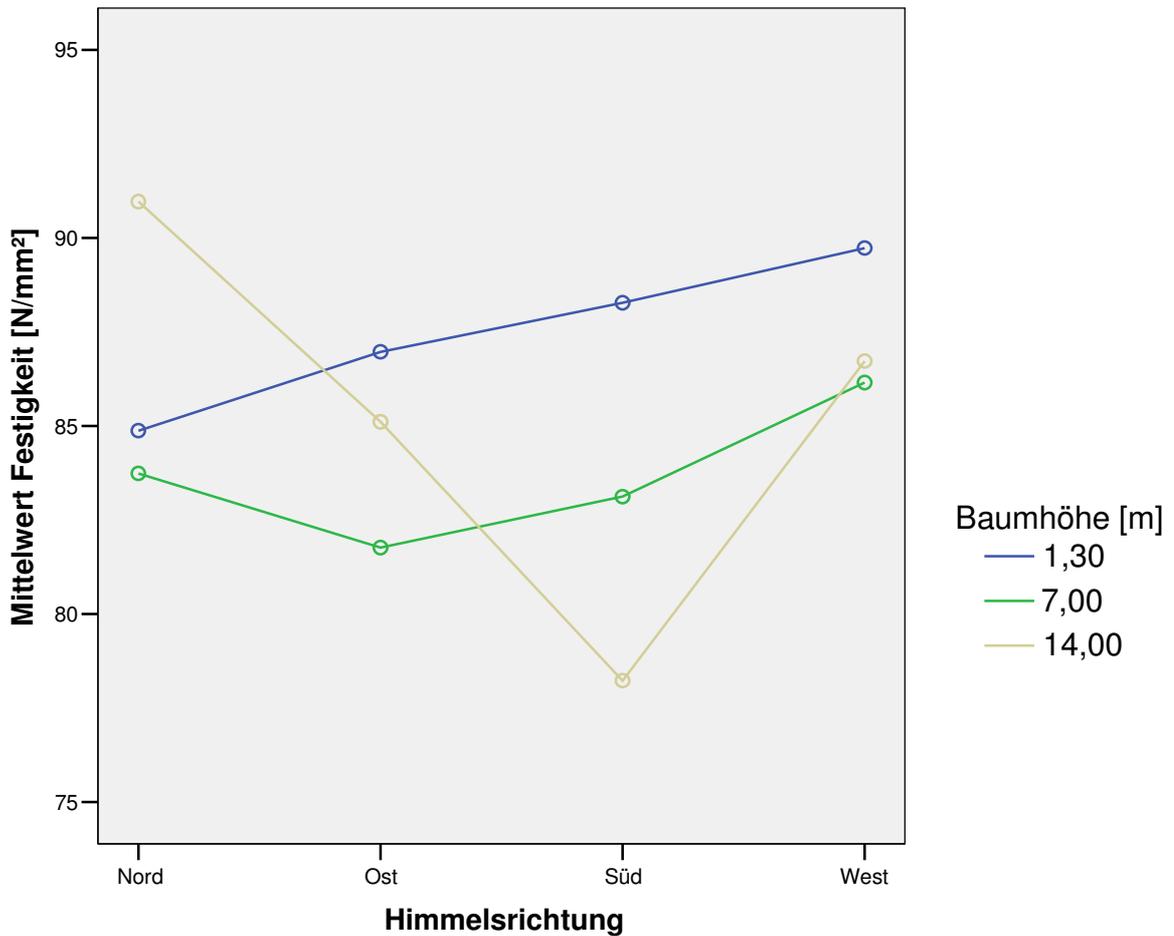


Abbildung 62: Fichte Nr. 73 - mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 62 zeigt den Verlauf der Biegefestigkeitsmittelwerte in drei verschiedenen Baumhöhen der Fichte Nr. 73 in den Haupthimmelsrichtungen. Den niedrigsten Festigkeitswert zeigt im Mittel die Südrichtung der Stammhöhe 14 [m], der in dieser Baumhöhe deutlich von den anderen Mittelwerten abweicht. Alle Biegefestigkeitswerte liegen über dem Mittelwert von 68 [N/mm²], welcher für die Fichte in der Literatur angegeben wird.

Fichte 73

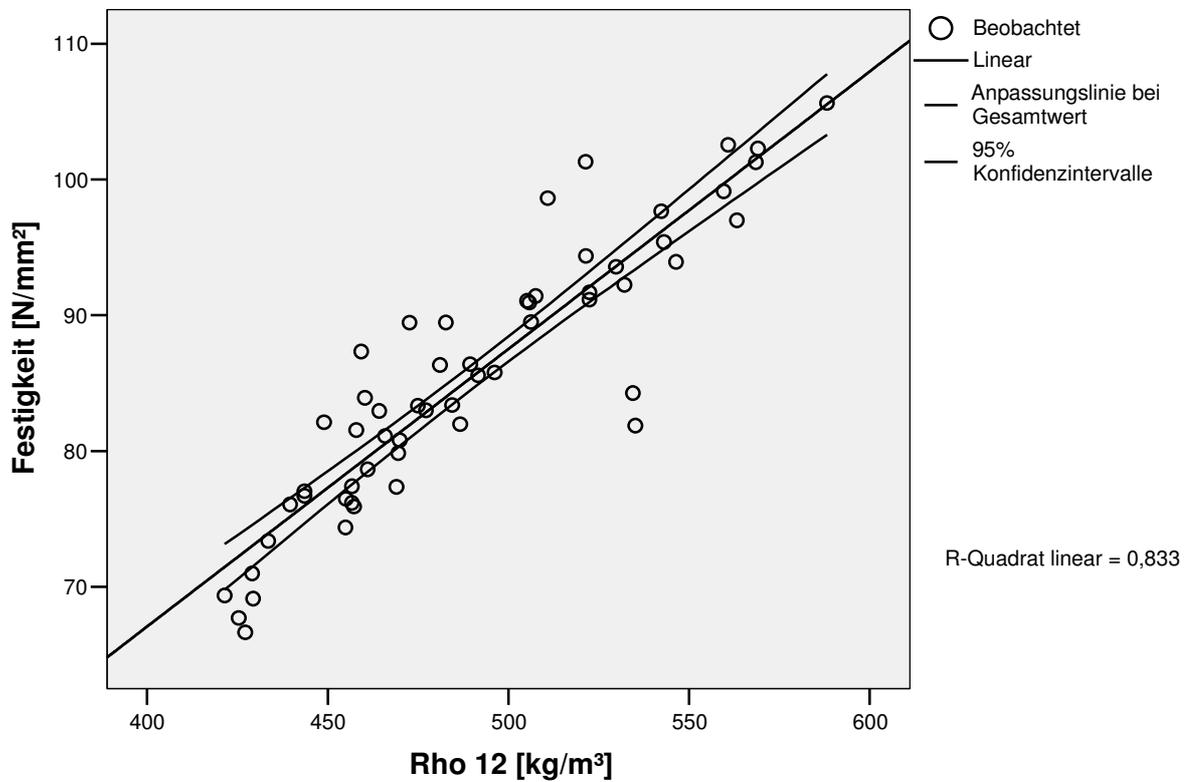


Abbildung 63: Fichte 73 – Streudiagramm Biegefestigkeit [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 21: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 63 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho 12 [kg/m ³]	0,204	0,012	0,913	0,000
(Konstante)	-14,711	6,118		0,020

Abbildung 63 zeigt den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Festigkeit bei der Fichte Nr. 73. Das Bestimmtheitsmaß [R²] beträgt 0.833 und unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der Festigkeitswerte wird zu 83% von der Rohdichte beeinflusst.

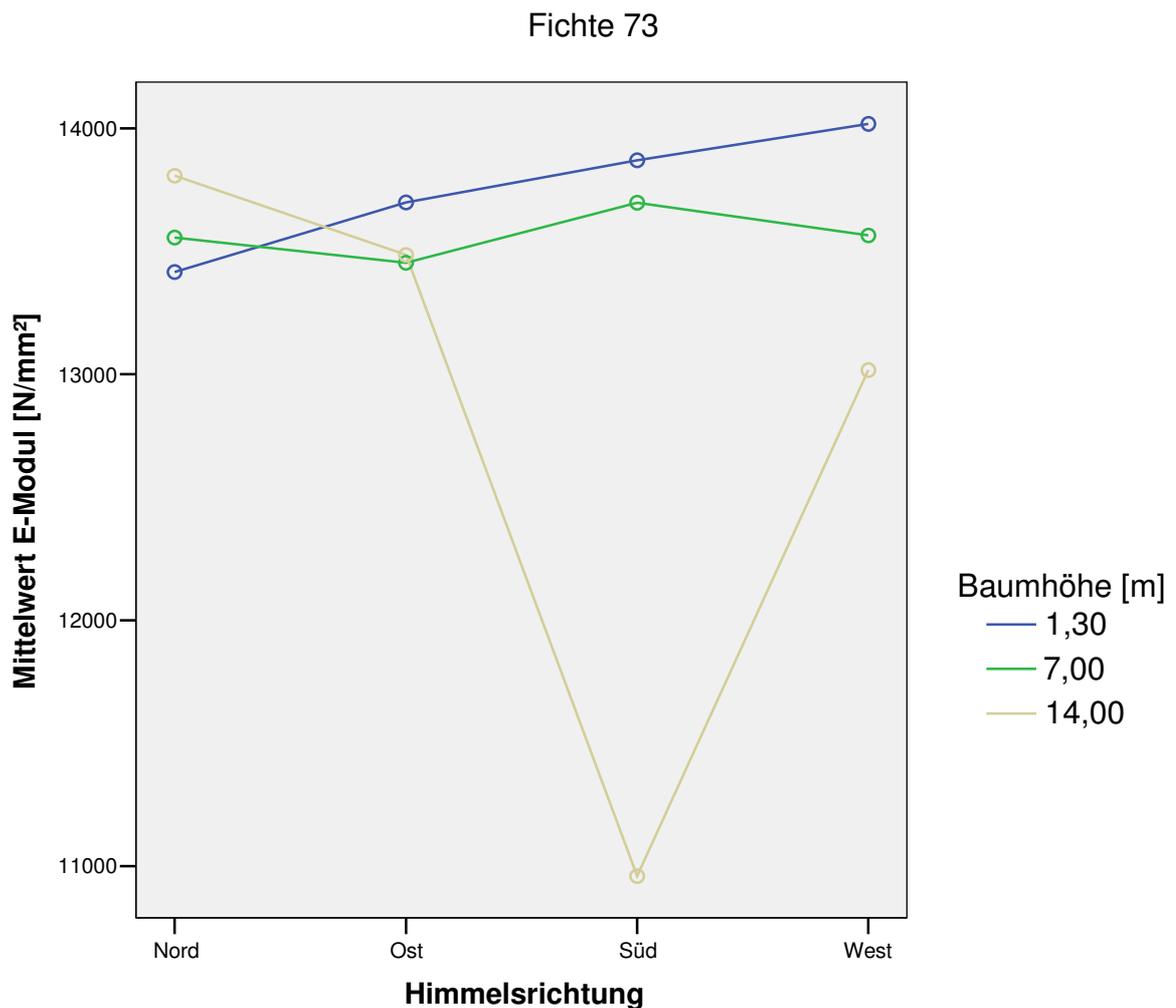


Abbildung 64: Fichte Nr. 73 - Mittlerer E-Modul [N/mm²] in drei Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 64 zeigt den Verlauf der E-Modul-Mittelwerte in drei verschiedenen Baumhöhen der Fichte Nr. 73 über die vier Haupthimmelsrichtungen aufgetragen. Einen deutlich niedrigen E-Modulwert zeigt wie auch bei der Rohdichte (s. Abb. 61) und Biegefestigkeit (s. Abb. 62) die Südrichtung in der Baumhöhe 14 [m]. Die E-Modulwerte von Nord und Ost liegen in allen drei Baumhöhen dicht beieinander. Insgesamt liegen alle mittleren Biege-E-Modulwerte über 11 000 [N/mm²]. In der Literatur wird für die Fichte ein Mittelwert von 10 000 [N/mm²] angegeben.

Fichte 73

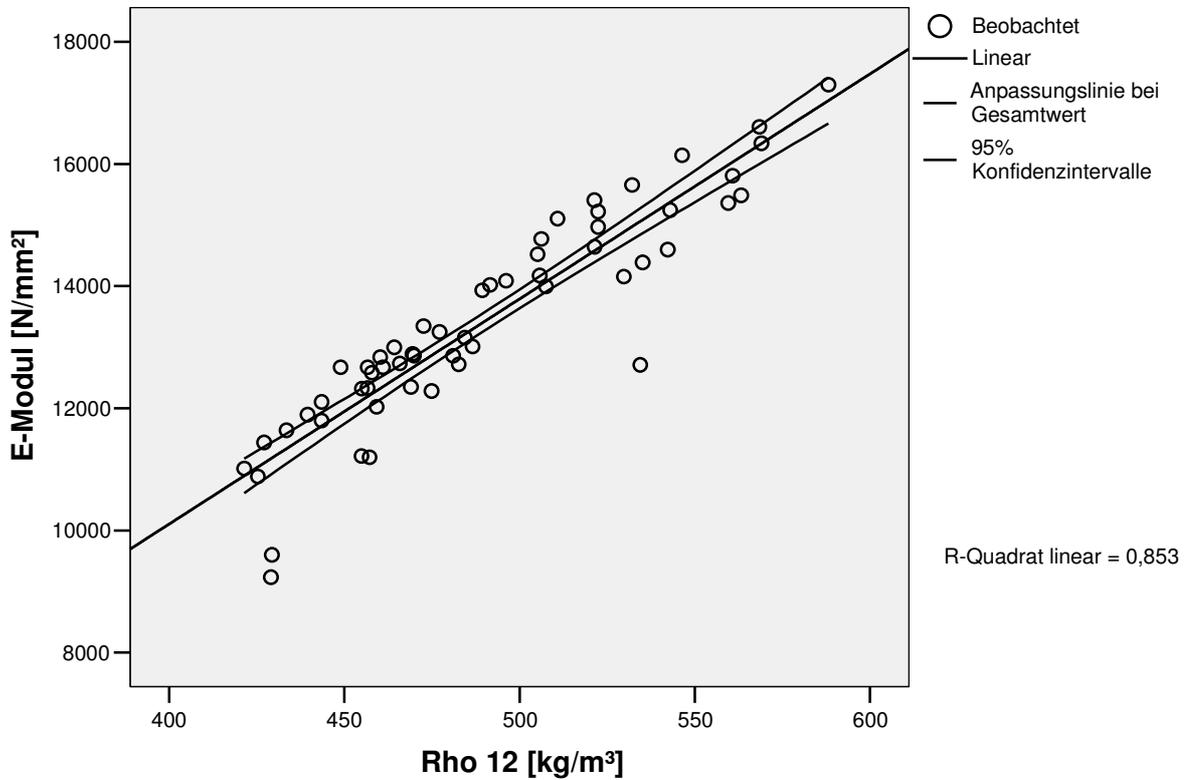


Abbildung 65: Fichte 73 – Streudiagramm E-Modul [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 22: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 65 sowie das Signifikanzniveau.

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho 12 [kg/m ³]	36,850	2,083	0,923	0,000
(Konstante)	-4635,660	1024,275		0,000

In Abbildung 65 wird der Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den E-Modul der Fichte Nr. 73 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß [R²] beträgt 0.853 und unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der E-Modul-Werte wird zu 85% von der Rohdichte beeinflusst. Der Einfluss der Rohdichte auf den E-Modul ist hier nur geringfügig höher als auf die Biegefestigkeit (83%; s. Abb. 63). Beide Werte weichen voneinander nicht so deutlich ab wie im Vergleich zu den Fichten Nr. 63 und Nr. 67.

4.5 Biegeprüfung nach DIN 52 186 - Buche

Rohdichte (tangential)

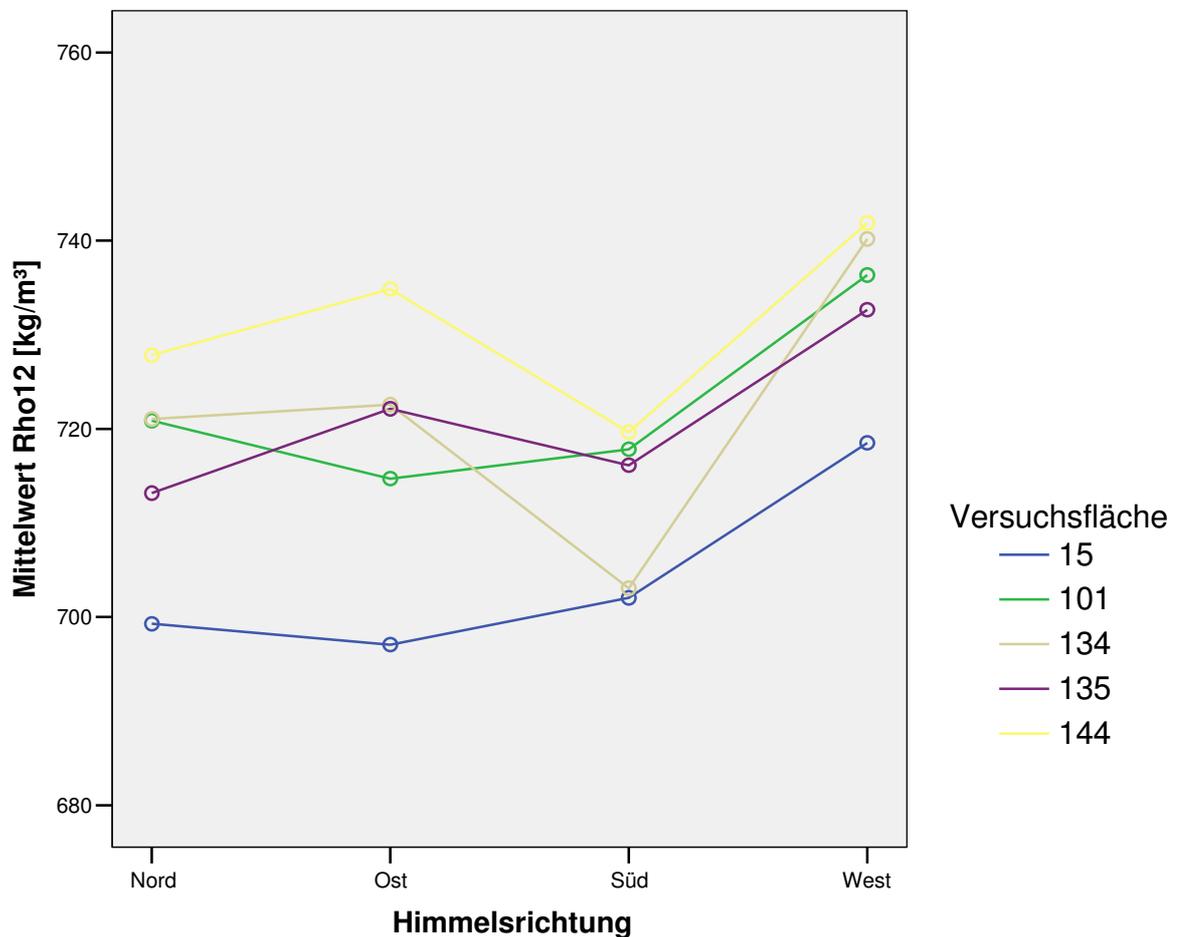


Abbildung 66: Fünf Versuchsflächen - mittlere Rohdichte [rho12] in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 66 zeigt für die Buchen der fünf Versuchsflächen den Mittelwert der Rohdichte [rho12] in den vier Haupthimmelsrichtungen. Die Mittelwerte aller Versuchsflächen liegen mit > 690 [kg/m³] deutlich über dem in der Literatur angegebenen Mittelwert von 680 [kg/m³]. Die Kurven der Versuchsflächen Zwiesel 134 und Schongau 144 zeigen einen ähnlichen Verlauf als auch die Kurven der beiden Versuchsflächen Fabrikschleichach 15 und Mitterteich 101 einen ähnlichen Verlauf zeigen.

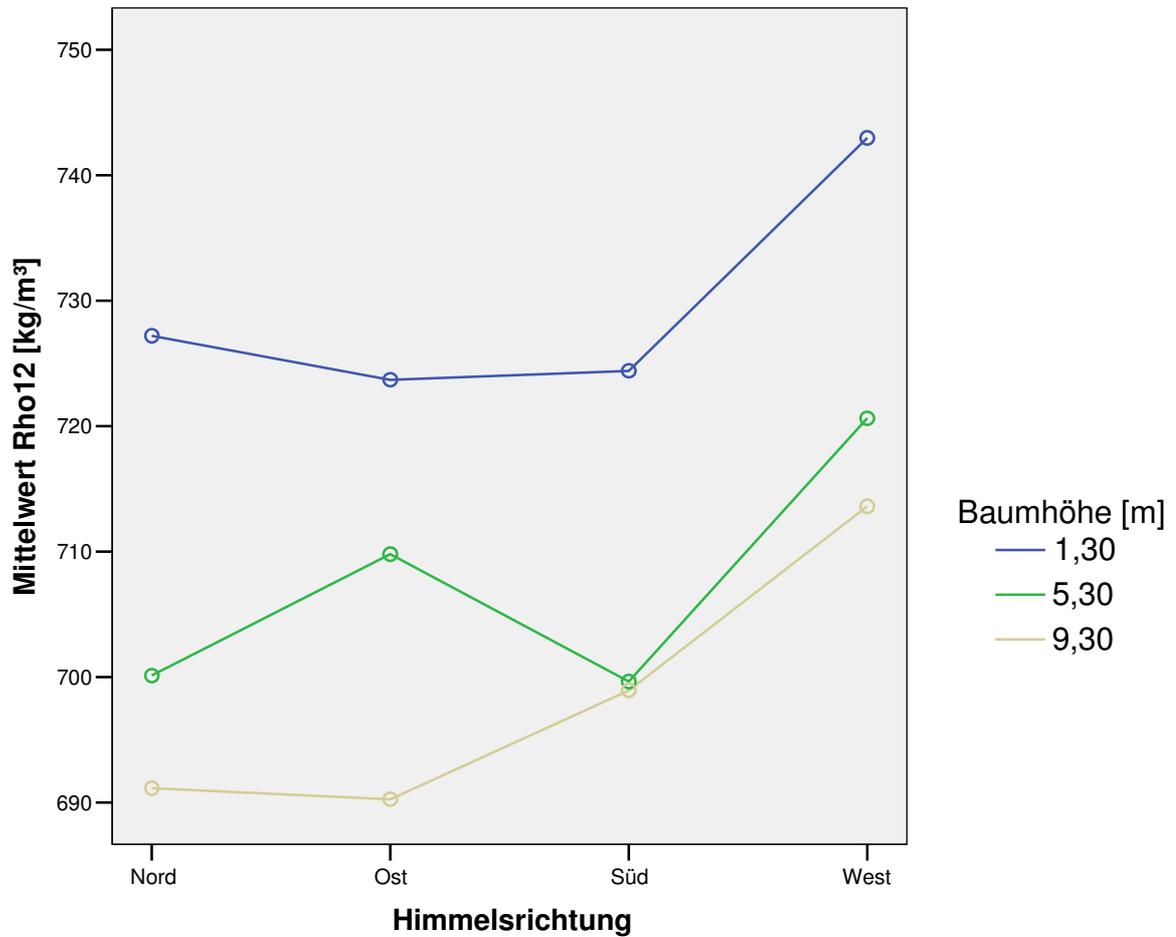


Abbildung 67: alle untersuchte Buchen - mittlere Rohdichte [rho12] in drei verschiedenen Baumhöhen in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 67 zeigt den Mittelwert der Rohdichte [rho12] aller Buchen in drei untersuchten Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen. Die Rohdichtewerte nehmen von 1,3 [m] bis 9,3 [m] ab, wobei in allen drei Baumhöhen die höchsten Werte im Westen auftreten. Der in der Literatur für Buche angegebene Mittelwert von 680 [kg/m³] wird um 10 [kg/m³] bis 60 [kg/m³] überschritten.

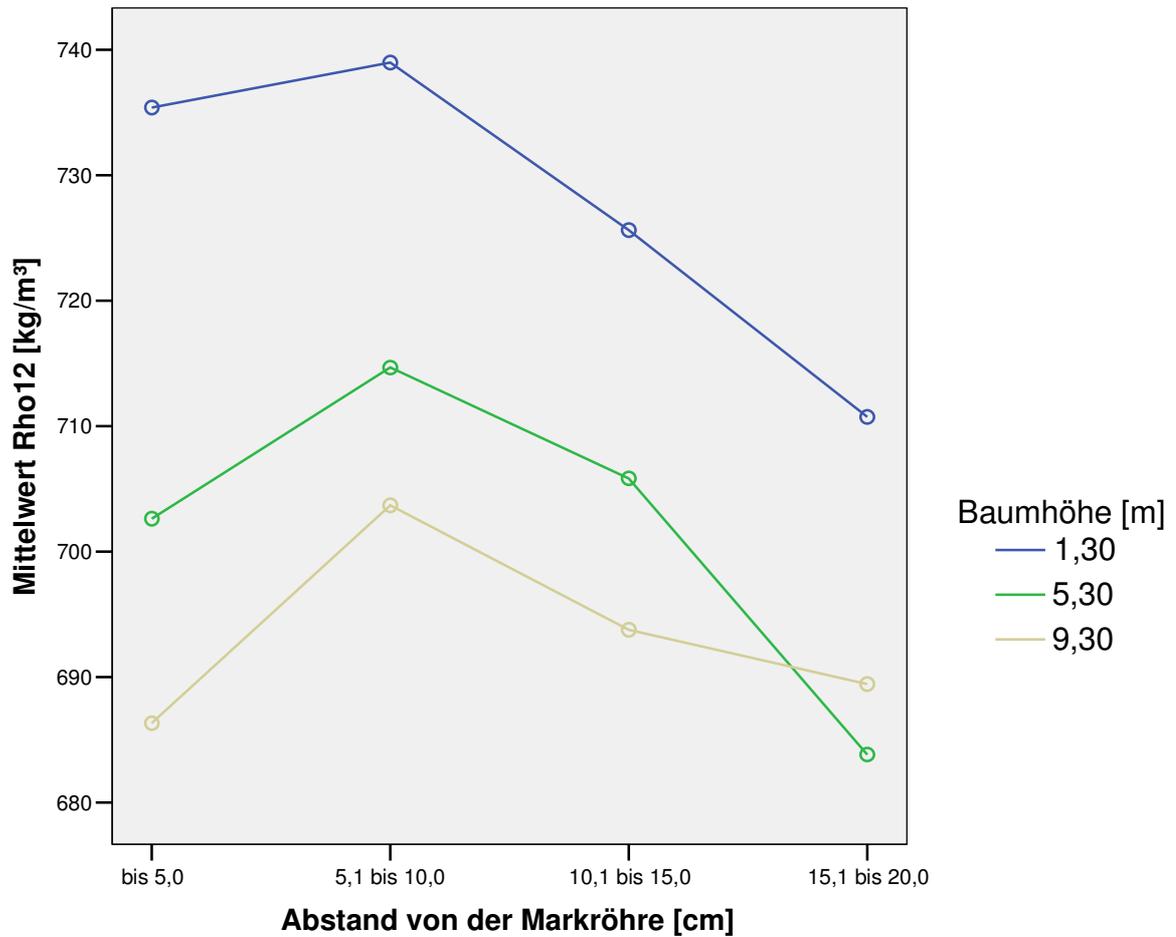


Abbildung 68: alle untersuchte Buchen - mittlere Rohdichte [rho12] in 5 [cm] - Abständen zur Markröhre in drei verschiedenen Baumhöhen.

Abbildung 68 zeigt für drei Baumhöhen den Mittelwert der Rohdichte [rho12] in 5 [cm] - Abständen von der Markröhre. Die Rohdichte nimmt von der Markröhre bis zu einem Abstand von ca. 10 [cm] zu und von dort bis zur Rinde nimmt sie stetig ab. Wie bei Abbildung 67, ist eine Abnahme der Rohdichte mit zunehmender Baumhöhe festzustellen.

Tabelle 23: Mittlere Rohdichte [ρ_{12}] in den vier Haupthimmelsrichtungen und gemittelt (gesamt) in drei verschiedenen Baumhöhe auf den fünf Versuchsflächen.

Baumhöhe [m]	Versuchsfläche	Nord			Ost			Süd			West			Gesamt		
		Anzahl	Mittelwert	S												
		[N]	[kg/m ³]		[N]	[kg/m ³]		[N]	[kg/m ³]		[N]	[kg/m ³]		[N]	[kg/m ³]	
1,30	15	71	714,0	29,9	61	701,1	35,1	66	712,7	42,2	77	731,3	38,7	275	715,7	38,1
	101	14	747,4	36,0	14	739,5	33,0	13	741,7	28,1	21	759,3	34,6	62	748,4	33,5
	134	5	765,2	35,3	7	764,0	30,1	6	733,6	43,8	4	775,4	21,8	22	758,0	35,7
	135	28	731,0	46,2	30	737,3	41,4	27	730,6	55,2	36	739,7	38,3	121	735,1	44,7
	144	24	741,9	51,1	23	743,9	43,6	20	740,5	65,2	20	770,0	39,8	87	748,6	51,1
Gesamt		142	727,2	40,6	135	723,7	42,9	132	724,4	49,0	158	743,0	40,4	567	730,1	43,8
5,30	15	64	693,8	43,8	63	702,8	41,9	51	695,1	37,4	61	710,4	35,8	239	700,7	40,4
	101	9	709,6	28,8	13	705,8	24,8	13	711,0	35,9	15	726,3	24,7	50	714,0	29,1
	134	8	697,0	54,2	8	716,8	40,4	8	683,7	65,9	8	726,6	49,9	32	706,0	53,5
	135	16	708,1	41,1	24	710,7	39,8	27	707,9	46,0	34	730,1	45,1	101	716,1	44,0
	144	17	712,6	47,7	18	732,7	45,2	18	698,9	40,6	22	728,3	34,4	75	718,7	43,1
Gesamt		114	700,1	43,8	126	709,8	41,2	117	699,6	42,1	140	720,6	38,5	497	708,2	42,1
9,30	15	46	684,1	41,5	44	683,2	36,2	40	693,2	41,6	37	705,2	37,1	167	690,7	39,8
	101	12	698,3	21,9	14	698,2	23,9	12	699,4	29,4	14	712,6	39,0	52	702,4	29,4
	134	6	716,2	54,0	7	687,7	73,3	5	697,4	48,9	5	733,7	40,2	23	707,3	56,4
	135	10	671,2	17,5	8	699,5	39,8	9	697,2	29,1	12	718,8	26,3	39	697,6	32,7
	144	10	719,8	49,6	7	710,5	20,5	14	716,5	53,9	15	724,3	36,2	46	718,8	42,6
Gesamt		84	691,1	41,2	80	690,2	38,4	80	698,9	41,6	83	713,6	36,4	327	698,5	40,4

Tabelle 23 enthält zusammenfassend die Mittelwerte der Rohdichte [ρ_{12}] in den drei Baumhöhen, getrennt nach Versuchsflächen und Himmelsrichtungen sowie die durchschnittliche Rohdichte (gesamt) für jede Versuchsfläche. Alle Mittelwerte liegen über dem, in der Literatur angegebenen Wert von $680 \text{ [kg/m}^3]$.

Biegefestigkeit [N/mm^2] nach DIN 52 186

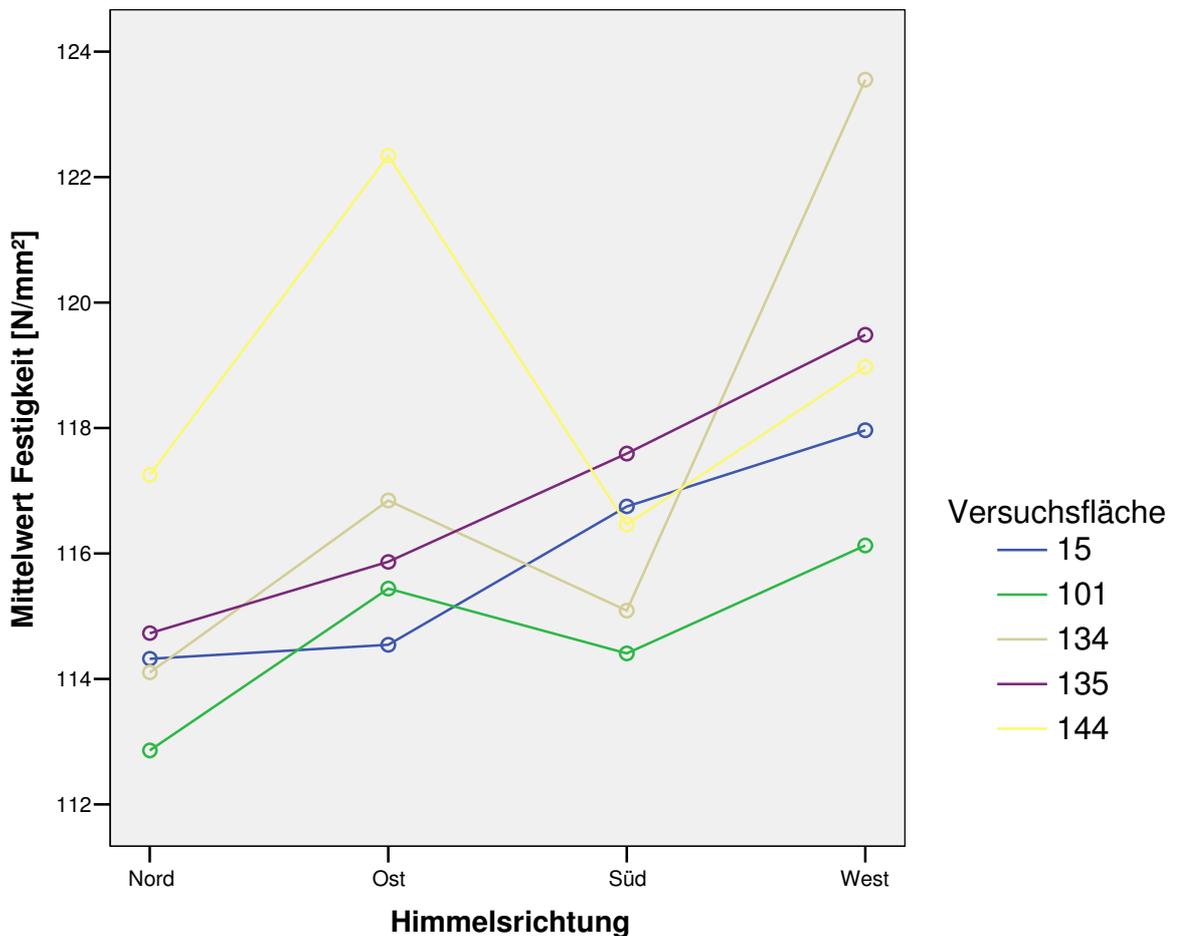


Abbildung 69: Fünf Versuchsflächen - mittlere Biegefestigkeit [N/mm^2] in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 69 zeigt für die fünf Versuchsflächen den Mittelwert der Biegefestigkeit [N/mm^2] in den vier Haupthimmelsrichtungen. Bei allen Versuchsflächen zeigt sich der niedrigste Biegefestigkeitswert im Norden. Die höchste Biegefestigkeit liegt, mit Ausnahme der Versuchsfläche Schongau 144, im Westen. Alle Mittelwerte liegen bis auf den Westwert von Schongau 144 unter dem in der Literatur angegebenen Wert von $120 \text{ [N/mm}^2]$.

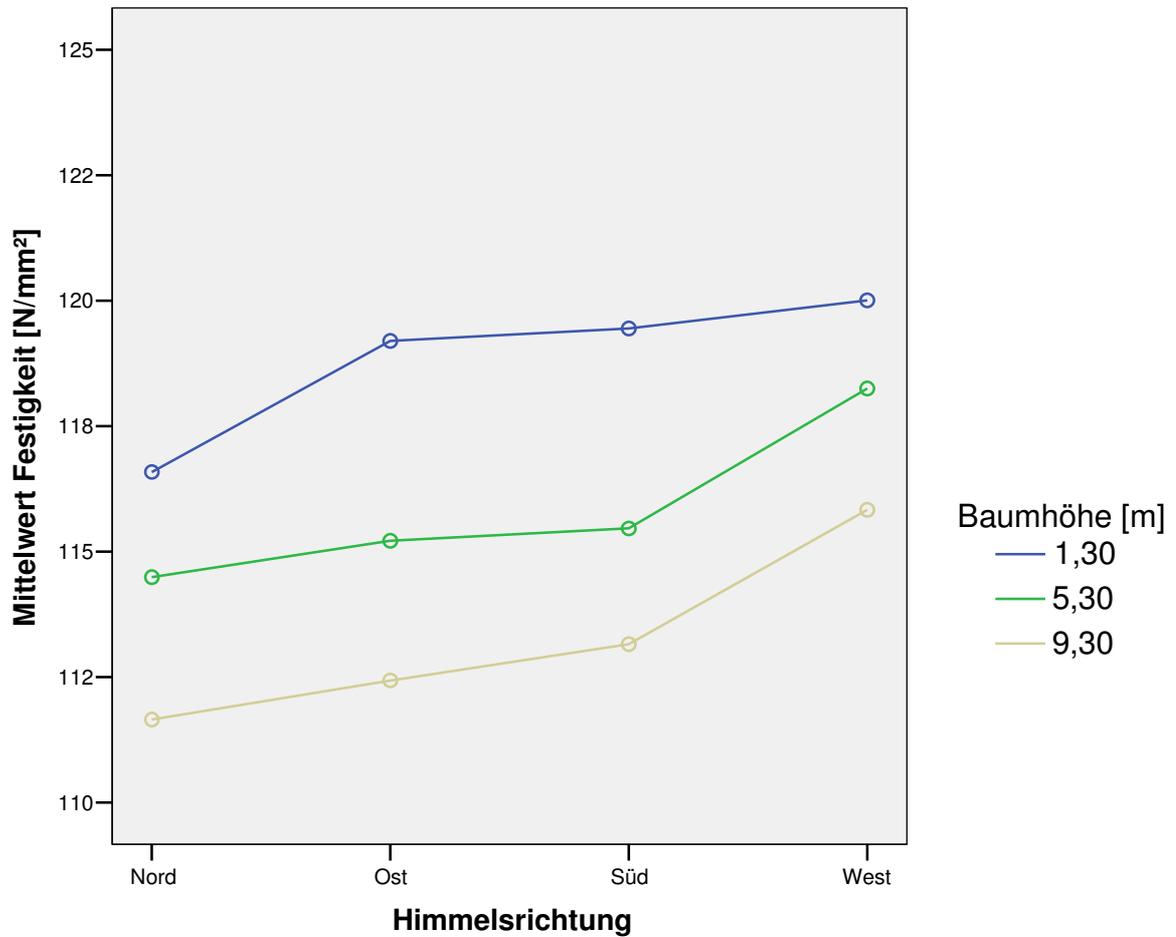


Abbildung 70: alle untersuchten Buchen - mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] in den drei verschiedenen Baumhöhen in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 70 zeigt für die drei Baumhöhen den Mittelwert der Biegefestigkeit [N/mm²] in den vier Haupthimmelsrichtungen für alle Buchen. Die Biegefestigkeit nimmt von 1,30 [m] bis 9,30 [m] ab. Alle Mittelwerte liegen unter dem in der Literatur angegebenen Wert von 120 [N/mm²]. Der jeweils niedrigste Wert liegt im Norden, der höchste Wert im Westen. Damit folgt die Biegefestigkeit bei den fehlerfreien Prüfkörper, dem Verlauf der Rohdichte.

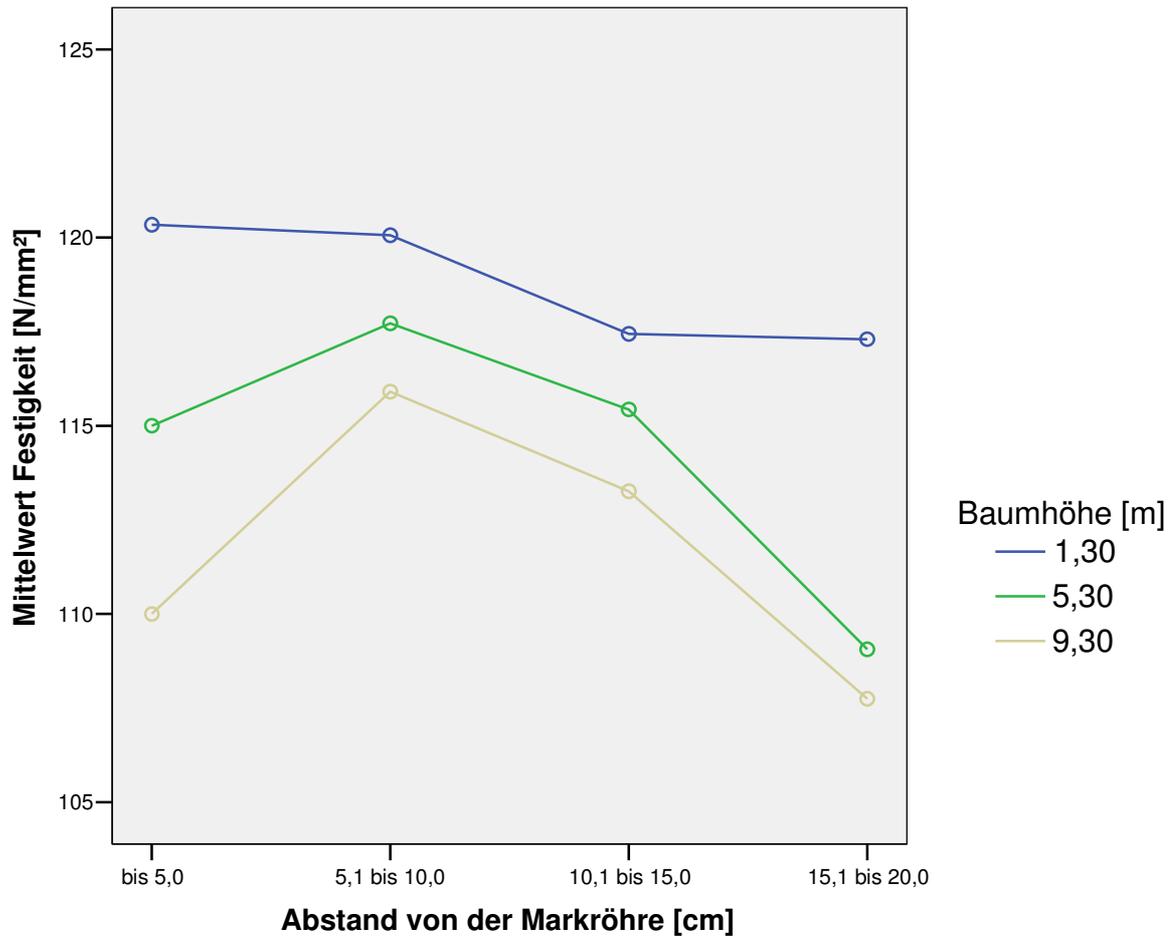


Abbildung 71: alle untersuchten Buchen - mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] in 5 [cm] - Abständen zur Markröhre in drei verschiedenen Baumhöhen.

Abbildung 71 zeigt die Mittelwerte der Biegefestigkeit [N/mm²] in den drei untersuchten Baumhöhen von der Markröhre zur Rinde in 5 [cm] - Abständen. Die Biegefestigkeit nimmt von der Stammbasis zur Krone ab. Sie nimmt in allen drei Höhen ab einem Abstand von ca. 10 [cm] von der Markröhre bis zur Rinde ab.

Tabelle 24: Mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] in den vier Haupthimmelsrichtungen und gemittelt für die jeweilige Baumhöhe (gesamt) pro untersuchter Baumhöhe auf den fünf Versuchsflächen.

Baumhöhe [m]	Versuchsfläche [-]	Nord			Ost			Süd			West			Gesamt		
		Anzahl	Mittelwert	S												
		[N]	[N/mm ²]		[N]	[N/mm ²]		[N]	[N/mm ²]		[N]	[N/mm ²]		[N]	[N/mm ²]	
1,30	15	71	116,1	10,7	61	116,5	10,0	66	119,3	10,4	77	119,8	10,2	275	118,0	10,4
	101	14	114,8	6,0	14	118,9	10,3	13	117,2	11,3	21	118,4	6,9	62	117,4	8,6
	134	5	117,4	7,8	7	120,1	12,3	6	118,3	7,3	4	131,0	2,3	22	121,0	9,6
	135	28	116,0	12,2	30	117,1	9,4	27	121,6	11,6	36	119,8	10,4	121	118,7	11,0
	144	24	119,6	8,0	23	129,0	10,3	20	118,7	13,4	20	120,5	8,4	87	122,1	10,8
Gesamt		142	116,6	10,1	135	119,2	10,9	132	119,4	11,0	158	120,0	9,6	567	118,8	10,4
5,30	15	64	114,3	10,7	63	114,9	8,8	51	116,2	10,6	61	117,8	10,9	239	115,8	10,3
	101	9	111,5	9,0	13	114,1	6,5	13	113,0	9,4	15	114,6	5,4	50	113,5	7,4
	134	8	106,5	6,4	8	117,4	5,9	8	114,4	10,0	8	115,9	10,6	32	113,6	9,1
	135	16	115,4	8,5	24	114,3	7,7	27	115,2	11,7	34	119,4	10,3	101	116,4	10,0
	144	17	119,7	9,2	18	117,4	14,7	18	115,9	11,0	22	121,0	5,8	75	118,6	10,5
Gesamt		114	114,5	10,1	126	115,2	9,3	117	115,5	10,6	140	118,2	9,7	497	116,0	10,0
9,30	15	46	111,7	9,1	44	111,4	9,8	40	113,2	14,4	37	114,3	10,7	167	112,5	11,1
	101	12	111,6	8,1	14	113,2	5,4	12	112,9	10,0	14	114,4	4,4	52	113,1	7,0
	134	6	121,4	12,1	7	112,9	13,8	5	112,3	4,7	5	129,8	13,0	23	118,7	13,0
	135	10	110,1	6,2	8	115,7	12,0	9	112,8	4,7	12	118,9	5,3	39	114,6	7,8
	144	10	107,4	12,9	7	113,4	6,7	14	113,9	9,8	15	113,9	12,2	46	112,4	11,0
Gesamt		84	111,6	9,7	80	112,4	9,5	80	113,2	11,7	83	115,8	10,3	327	113,3	10,4

Tabelle 24 enthält zusammenfassend den Mittelwerte der Biegefestigkeit [N/mm²] in den drei Baumhöhen, getrennt nach Versuchsfläche und Himmelsrichtung sowie die durchschnittliche Biegefestigkeit (gesamt) für jede Versuchsfläche.

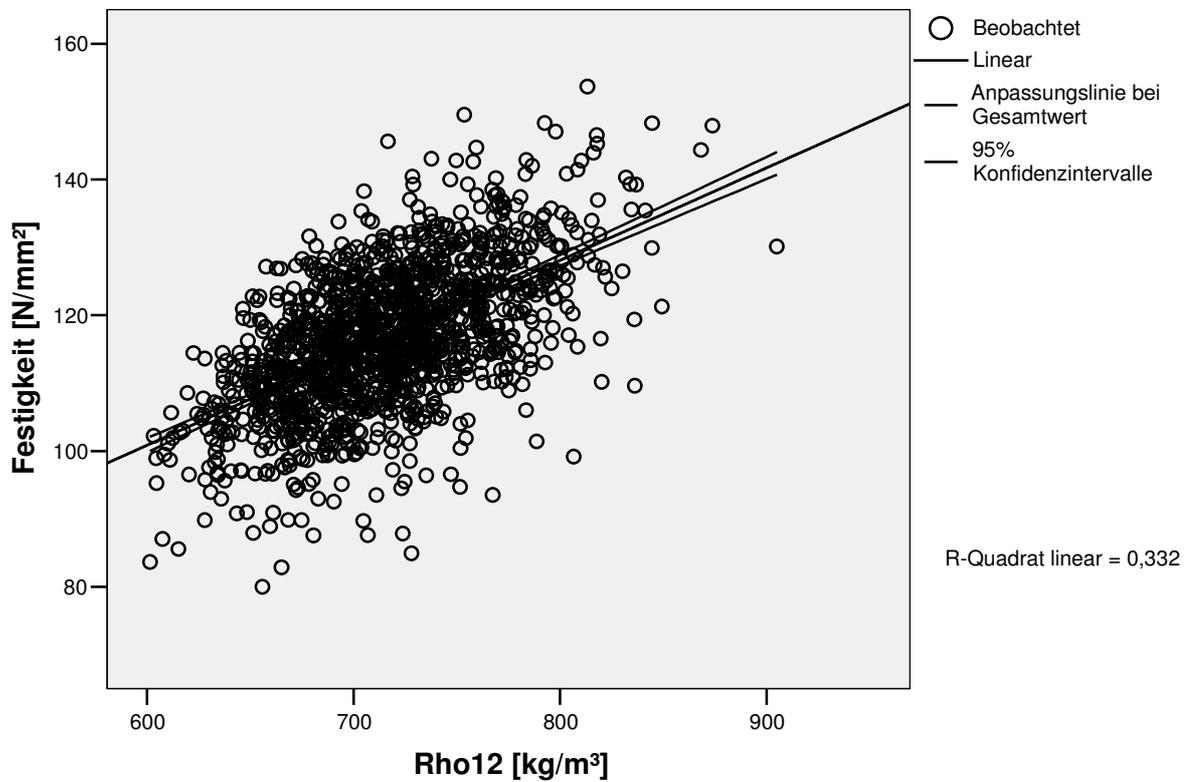


Abbildung 72: alle untersuchten Buchen - Streudiagramm Biegefestigkeit [N/mm²] über Rohdichte [rho12; kg/m³].

Tabelle 25: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 72 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho12 [kg/m ³]	0,136	0,005	0,576	0,000
(Konstante)	19,138	3,716		0,000

Abbildung 72 zeigt den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Biegefestigkeit [N/mm²] für alle untersuchten Buchen. Das Bestimmtheitsmaß [R²] von 0,33 unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Varianz der Streuung der Festigkeitswerte wird zu 33% von der Rohdichte beeinflusst.

Tabelle 26: Bestimmtheitsmaß [R²] pro Versuchsfläche für den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Biegefestigkeit [N/mm²].

Versuchsfläche	Einfluss Rohdichte [rho12] auf Festigkeit [N/mm ²]		
	Bestimmtheitsmaß [R ²]	Anzahl [N]	Signifikanz [-]
Fabrikschleichach 015	0.28	681	0,00
Mitterteich 101	0.35	164	0,00
Zwiesel 134	0.43	77	0,00
Zwiesel 135	0.47	261	0,00
Schongau 144	0.32	208	0,00

Tabelle 26 enthält getrennt nach Versuchsflächen die Bestimmtheitsmaße [R²], die den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Biegefestigkeit beschreiben. Das höchste Bestimmtheitsmaß [R²] weist die Versuchsfläche Zwiesel 135 mit 0.47 auf, das niedrigste in der Versuchsfläche Fabrikschleichach 15 beträgt 0.28. Die Bestimmtheitsmaße der fünf Versuchsflächen unterscheiden sich signifikant von 0,00.

Biege-E-Modul [N/mm²] nach DIN 52186

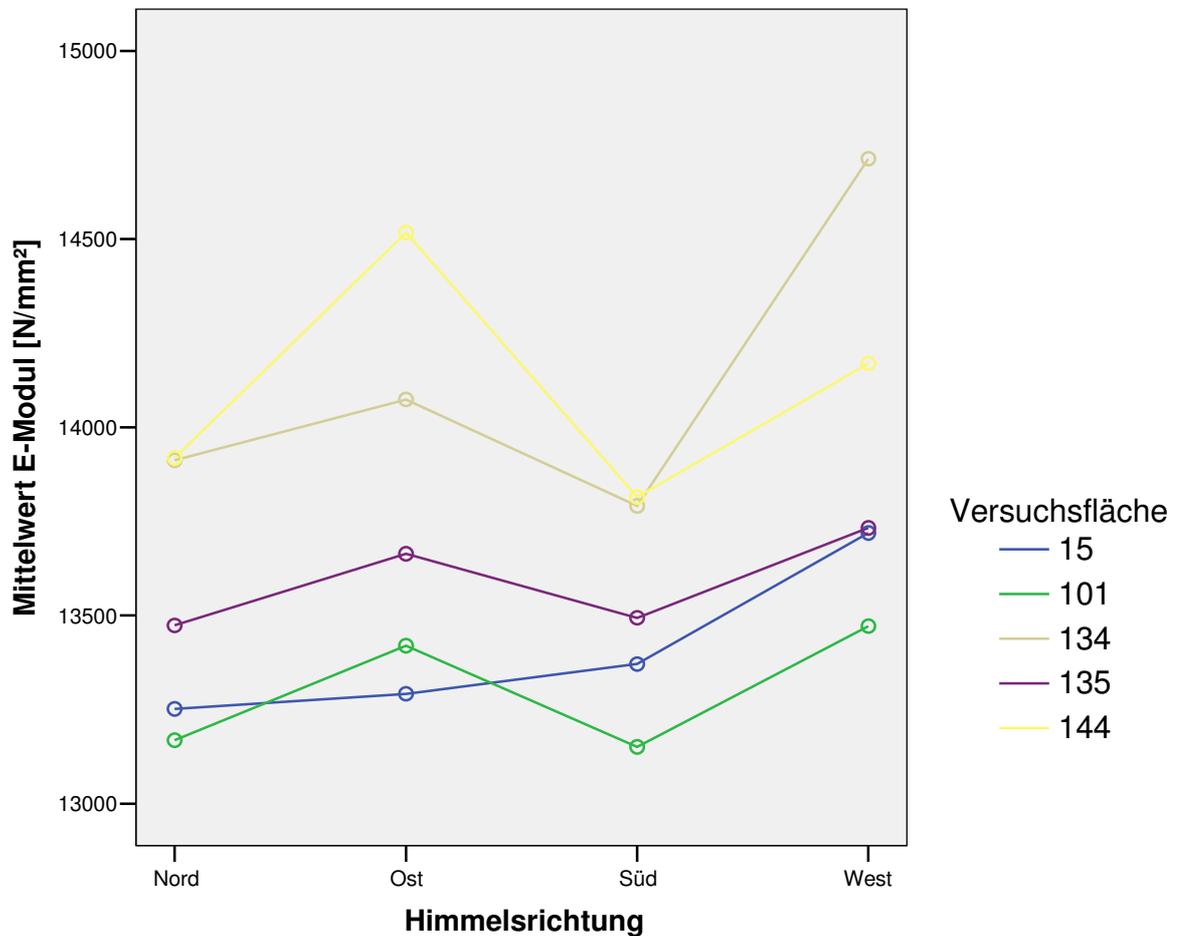


Abbildung 73: Fünf Versuchsflächen - Mittlerer E-Modul [N/mm²] in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 73 zeigt die Mittelwerte des E-Modul [N/mm²] der verschiedenen Versuchsflächen über den vier Haupthimmelsrichtungen. Die Versuchsflächen Mitterteich 101 und Zwiesel 135 zeigen einen ähnlichen Verlauf mit Unterschieden in den Mittelwerten. Nur zwei Werte liegen über dem Literaturmittelwert für die Buche von 14 000 [N/mm²]. Dieses sind die Ost- und Westrichtung der Versuchsfläche Schongau 144 sowie der Wert in der Westrichtung von Zwiesel 134.

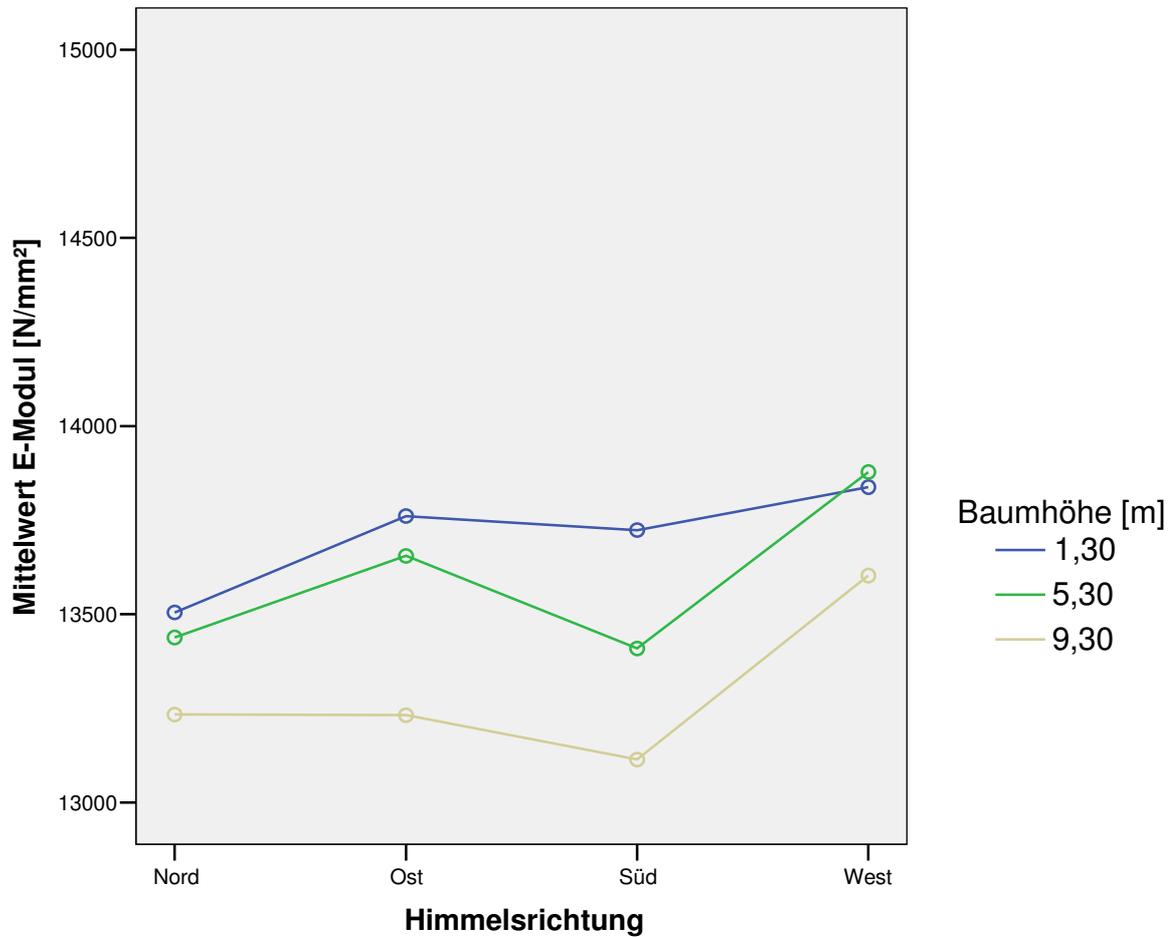


Abbildung 74: alle untersuchten Buchen – mittlerer Biege-E-Modul [N/mm²] in drei verschiedenen Baumhöhen in den vier Haupthimmelsrichtungen.

Abbildung 74 zeigt die Mittelwerte des Biege-E-Modul [N/mm²] für alle Buchen in den untersuchten drei Baumhöhen aufgetragen über den Haupthimmelsrichtungen. Der E-Modul nimmt von der Stammbasis zur Krone ab. Er steigt in allen Baumhöhen im Westen auf seinen höchsten Wert an. Alle Werte liegen unter dem Mittelwert für die Buche von 14 000 [N/mm²].

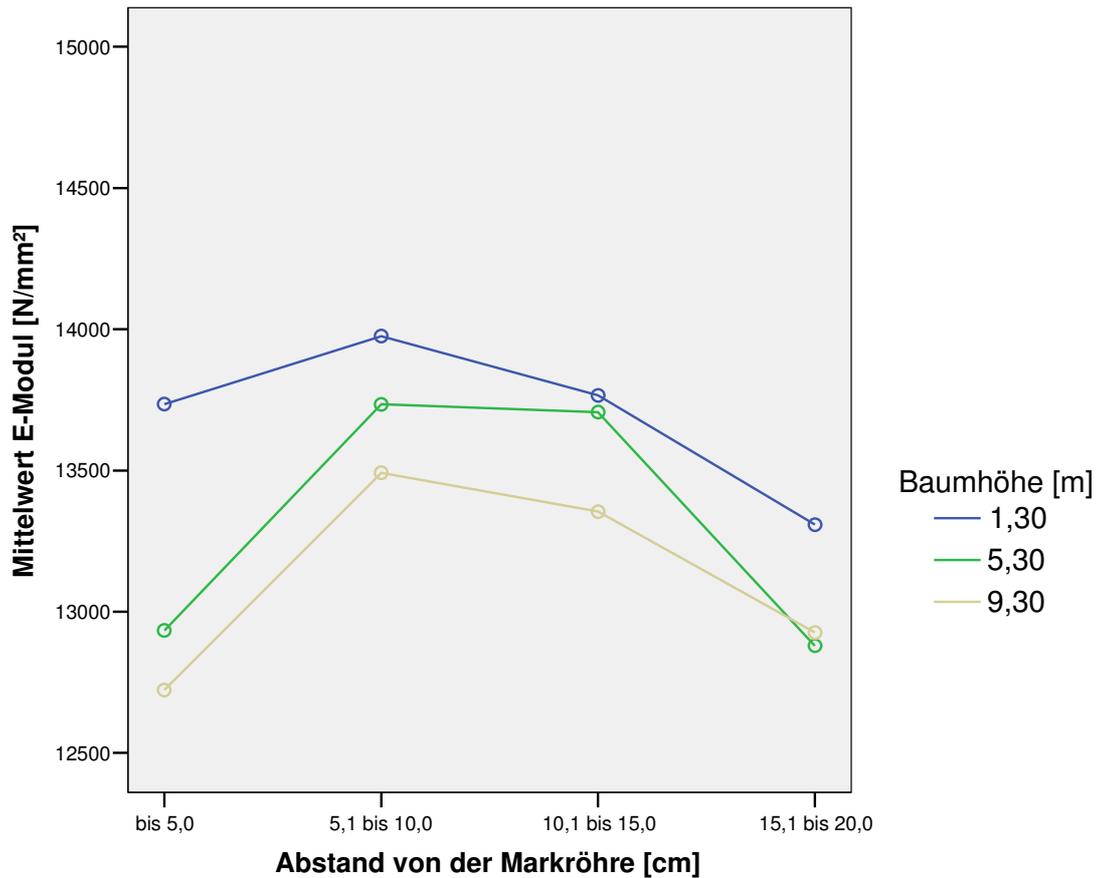


Abbildung 75: alle untersuchten Buchen - mittlerer Biege-E-Modul in 5 [cm] - Abständen zur Markröhre in drei verschiedenen Baumhöhen.

Die Abbildung 75 zeigt die Mittelwerte des Biege-E-Modul [N/mm²] in den drei untersuchten Baumhöhen in 5 [cm] - Abständen von der Markröhre bis zur Rinde. Der Biege-E-Modul nimmt von der Stammbasis zur Krone ab. Er nimmt in allen drei Höhen bis zu einem Abstand von ca. 10 [cm] in seinem Mittelwert deutlich zu, ab dieser Entfernung nimmt er bis zur Rinde wieder ab.

Tabelle 27: mittlerer E-Modul [N/mm²] in den vier Haupthimmelsrichtungen pro untersuchter Baumhöhe und gemittelt (gesamt) auf fünf Versuchsflächen.

Baumhöhe [m]	Versuchs- fläche	Nord			Ost			Süd			West			Gesamt		
		[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]	[N]	[MW]	[S]
		[N]	[N/mm ²]		[N]	[N/mm ²]		[N]	[N/mm ²]		[N]	[N/mm ²]		[N]	[N/mm ²]	
1,30	15	71	13364	1072	61	13346	1045	66	13660	1098	77	13860	1045	275	13570	1081
	101	14	13041	820	14	13395	932	13	13124	1107	21	13387	969	62	13255	950
	134	5	14311	1534	7	14747	1459	6	14154	884	4	15238	565	22	14575	1204
	135	28	13624	1273	30	13701	1036	27	13821	1225	36	13686	1138	121	13706	1154
	144	24	13882	1037	23	14861	983	20	14061	1249	20	14218	1013	87	14259	1119
Gesamt		142	13505	1125	135	13761	1188	132	13723	1153	158	13838	1081	567	13709	1139
5,30	15	64	13264	1161	63	13439	934	51	13308	1226	61	13716	1122	239	13435	1118
	101	9	13374	931	13	13602	693	13	13171	1193	15	13647	669	50	13462	880
	134	8	13277	1170	8	13969	938	8	13457	1208	8	14183	1211	32	13721	1144
	135	16	13529	1100	24	13567	1154	27	13358	1307	34	13757	1393	101	13569	1263
	144	17	14116	1005	18	14426	1317	18	13920	1024	22	14559	696	75	14273	1030
Gesamt		114	13438	1136	126	13655	1061	117	13409	1213	140	13878	1138	497	13610	1150
9,30	15	46	13060	828	44	13004	1006	40	12973	1348	37	13430	1164	167	13107	1095
	101	12	13163	902	14	13275	687	12	13157	1046	14	13410	824	52	13259	846
	134	6	14428	1780	7	13520	2122	5	13889	684	5	15143	1703	23	14190	1716
	135	10	12964	863	8	13813	846	9	12919	792	12	13801	948	39	13385	944
	144	10	13668	1411	7	13622	733	14	13327	975	15	13534	1132	46	13513	1078
Gesamt		84	13233	1058	80	13232	1076	80	13114	1164	83	13602	1164	327	13297	1126

Tabelle 27 enthält die Mittelwerte des E-Modul [N/mm²] in den drei untersuchten Baumhöhen für jede Versuchsfläche in den Haupt-himmelsrichtungen und den jeweiligen Mittelwert [MW] und die Standardabweichung [S] der vier Himmelsrichtungen (gesamt).

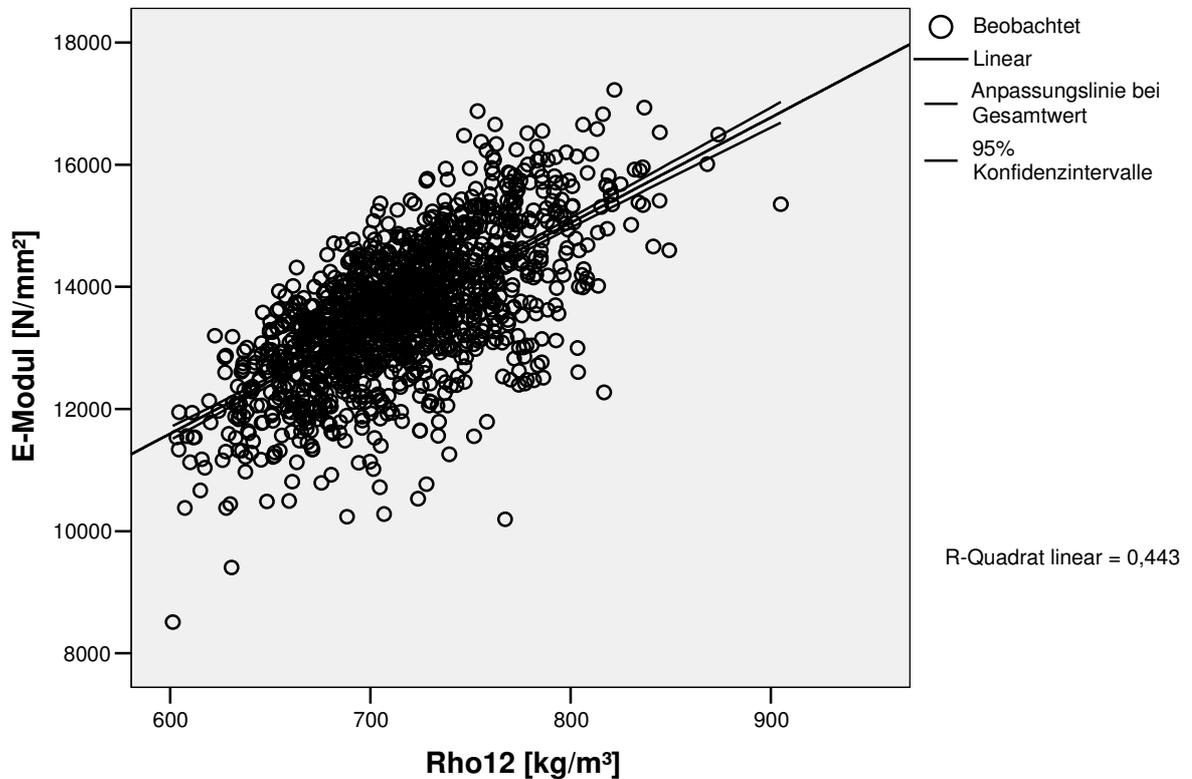


Abbildung 76: alle untersuchten Buchen - Streudiagramm E-Modul [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 28: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 76 sowie das Signifikanzniveau.

Y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho12 [kg/m ³]	17,257	0,519	0,666	0,000
(Konstante)	1240,272	371,789		0,001

Abbildung 76 zeigt den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den E-Modul [N/mm²] bei allen untersuchten Buchen. Das Bestimmtheitsmaß [R²] von 0.443 zeigt, dass die Varianz der Streuung der E-Modulwerte zu 44% von der Rohdichte beeinflusst wird. Der Einfluss der Rohdichte auf die Biegefestigkeit ist schwächer ausgeprägt (33%; s. Abb. 72).

Tabelle 29: Bestimmtheitsmaß [R²] pro Versuchsfläche für den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den E-Modul [N/mm²].

Versuchsfläche	Einfluss Rohdichte auf den E-Modul [N/mm ²]		
	Bestimmtheitsmaß [R ²]	Anzahl [N]	Signifikanz [-]
Fabriksleichach 015	0.46	681	0,00
Mitterteich 101	0.31	164	0,00
Zwiesel 134	0.56	77	0,00
Zwiesel 135	0.40	261	0,00
Schongau 144	0.43	208	0,00

Tabelle 29 enthält von den verschiedenen Versuchsflächen die Bestimmtheitsmaße [R²], die den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den E-Modul beschreiben. Es sind z. T. deutliche Unterschiede in den Bestimmtheitsmaßen zwischen den Versuchsflächen zu erkennen. Das höchste Bestimmtheitsmaß [R²] hat die Versuchsfläche Zwiesel 134 mit 0.56 im Gegensatz zu dem niedrigsten von Mitterteich 101 mit 0.31. Die Bestimmtheitsmaße unterscheiden sich alle signifikant von 0,00.

Einzelbaumweise Auswertung von Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-E-Modul: Min, Mittel, Max.

Anmerkung:

Von allen fünf untersuchten Versuchsflächen markieren die drei Buchen der einzelbaumweisen Auswertung den unteren, mittleren und oberen Bereich der Rohdichtewertestreuung von allen untersuchten Buchen.

Die **Buche Nr. 31** besitzt im Mittel die niedrigste Rohdichte von allen untersuchten Buchen.

Die **Buche Nr. 36** besitzt im Mittel den Rohdichtemittelwert der am nächsten dem Mittelwert von allen untersuchten Buchen entspricht.

Die **Buche Nr. 35** besitzt im Mittel die höchste Rohdichte von allen untersuchten Buchen.

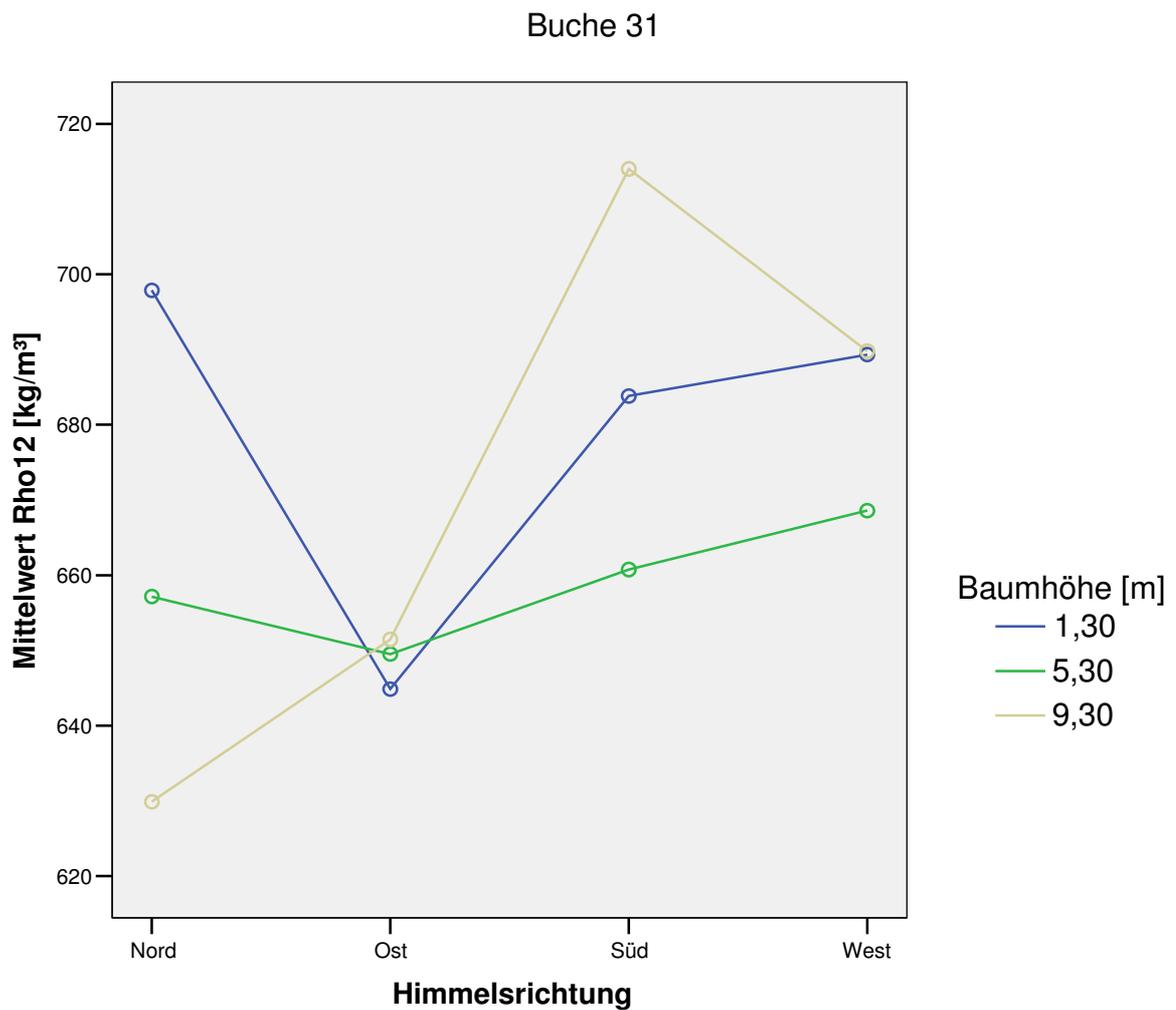


Abbildung 77: Buche Nr. 31 – mittlere Rohdichte [rho12] in drei verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen

Abbildung 77 zeigt die mittlere Rohdichte der Buche Nr. 31 über den Haupthimmelsrichtungen in den drei untersuchten Baumhöhen. Alle drei Kurvenverläufe weichen deutlich voneinander ab. Nur in der Baumhöhe von 5,3 [m] bleiben die Werte unter dem Literatur-Mittelwert für die Buche von 680 [kg/m³].

Buche 31

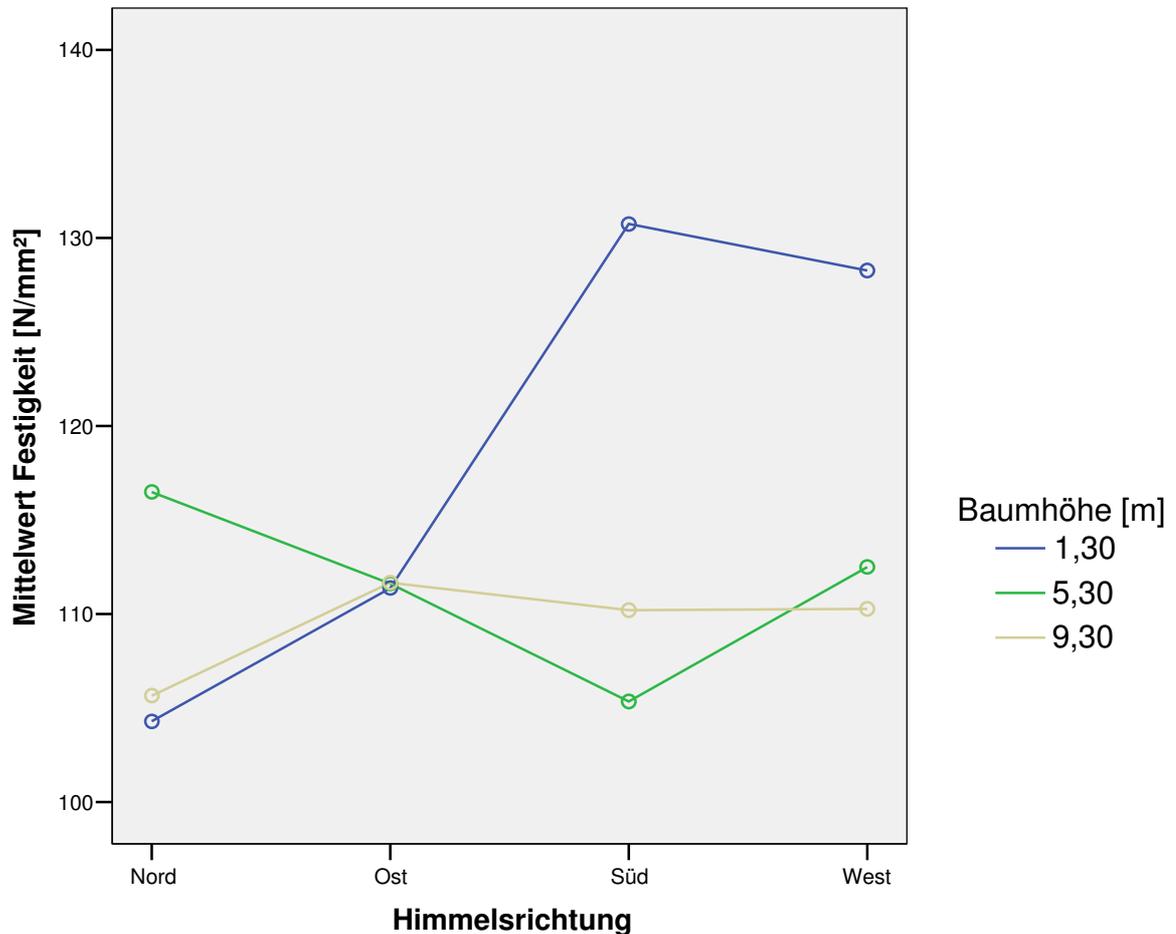


Abbildung 78: Buche Nr. 31 – mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] in drei verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen

Die mittlere Biegefestigkeit in den drei untersuchten Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen zeigt Abbildung 78 für die Buche Nr. 31. Die Kurvenverläufe weichen wie auch schon bei der Rohdichte (s. Abb. 77) deutlich voneinander ab. Die höchsten Festigkeitswerte liegen in der untersten Baumhöhe von 1,3 [m] in Süd- und Westrichtung, dort auch über dem in der Literatur für die Buche angegebenen Mittelwert von 120 [N/mm²].

Buche 31

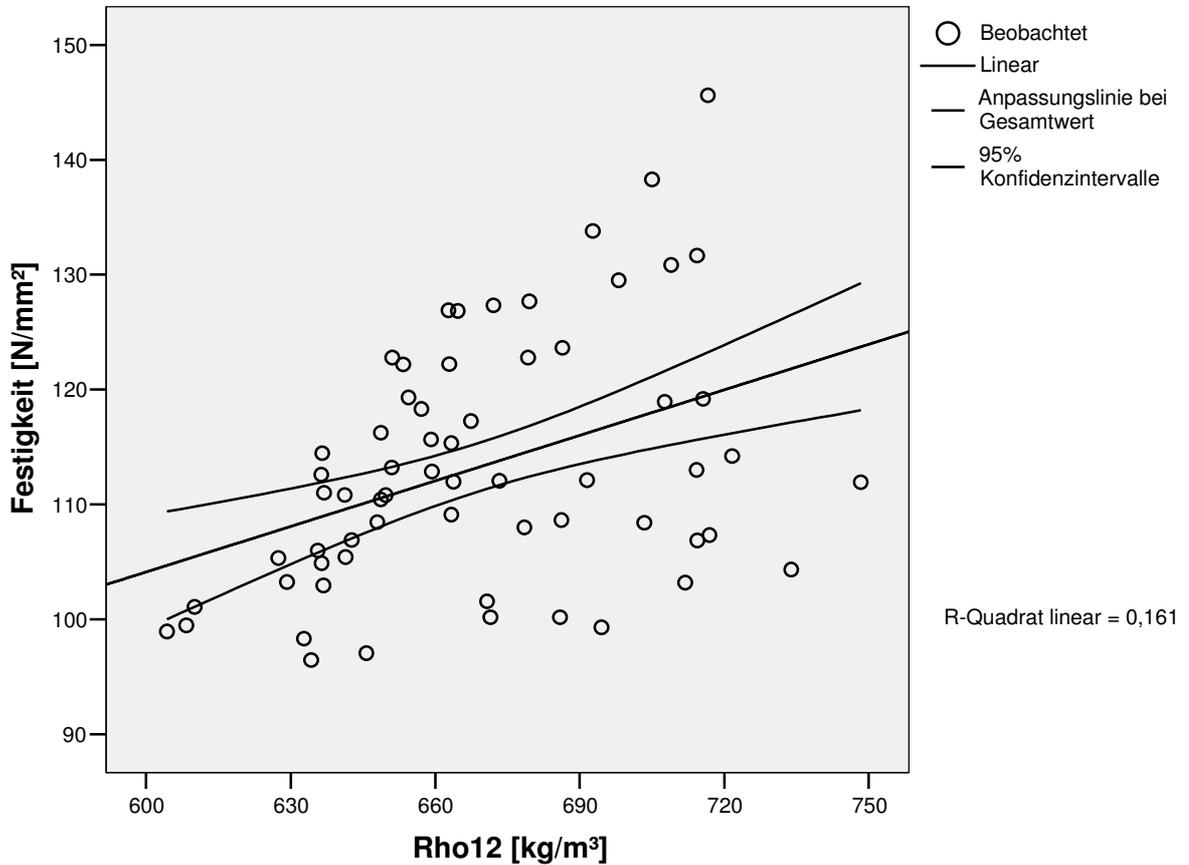


Abbildung 79: Buche Nr. 31 - Streudiagramm von Biegefestigkeit [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 30: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 79 sowie das Signifikanzniveau.

y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho12 [kg/m ³]	0,132	0,039	0,401	0,001
(Konstante)	24,833	25,923		0,342

In Abbildung 79 wird der Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Biegefestigkeit [N/mm²] bei der Buche Nr. 31 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß [R²] von 0.161 unterscheidet sich signifikant von 0,001. Die Festigkeit wird zu 16% von der Rohdichte beeinflusst.

Buche 31

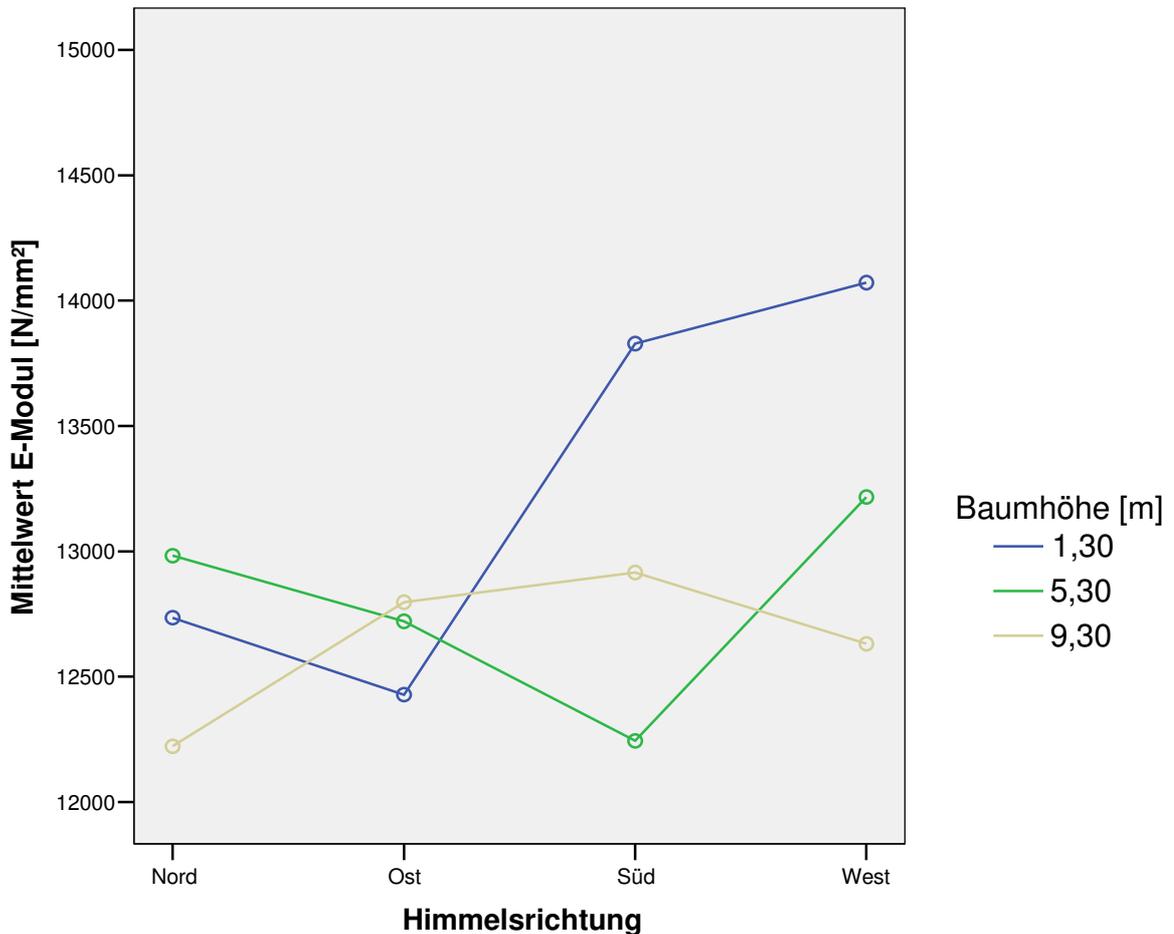


Abbildung 80: Buche Nr. 31 – mittlerer Biege-E-Modul [N/mm²] in drei verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen

Der mittlere Biege-E-Modul in den drei untersuchten Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen zeigt Abbildung 80. Die Kurven unterscheiden sich deutlich in ihren Verläufen. Wie bei der Biegefestigkeit (s. Abb. 78) liegen die beiden höchsten Werte in 1,3 [m] Baumhöhe in Süd- und Westrichtung. Außer der letztgenannten Westrichtung liegen alle Werte unter 14 000 [N/mm²], d. h. dem in der Literatur für die Buche angegebenen Mittelwert.

Buche 31

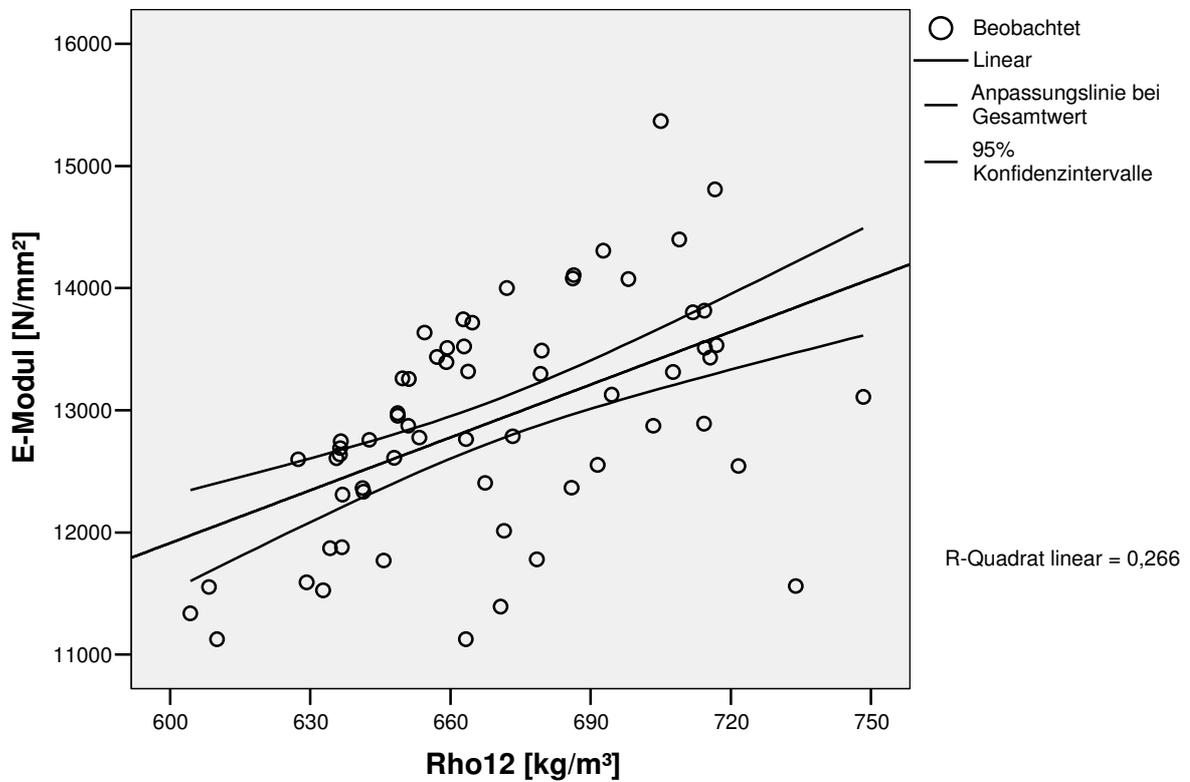


Abbildung 81: Buche Nr. 31 - Streudiagramm Biege-E-Modul [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 31: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 81 sowie das Signifikanzniveau.

$y = a + bx$	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho12 [kg/m³]	14,411	3,068	0,515	0,000
(Konstante)	3266,391	2055,141		0,117

Abbildung 81 zeigt den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den Biege-E-Modul [N/mm²] bei der Buche Nr. 31. Das Bestimmtheitsmaß [R²] von 0.266 unterscheidet sich signifikant von 0,00. Der Biege-E-Modul wird gering von der Rohdichte beeinflusst. Die Biegefestigkeit wird deutlich schwächer mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,161 (s. Abb. 79) von der Rohdichte bei dieser Buche beeinflusst.

Buche 36

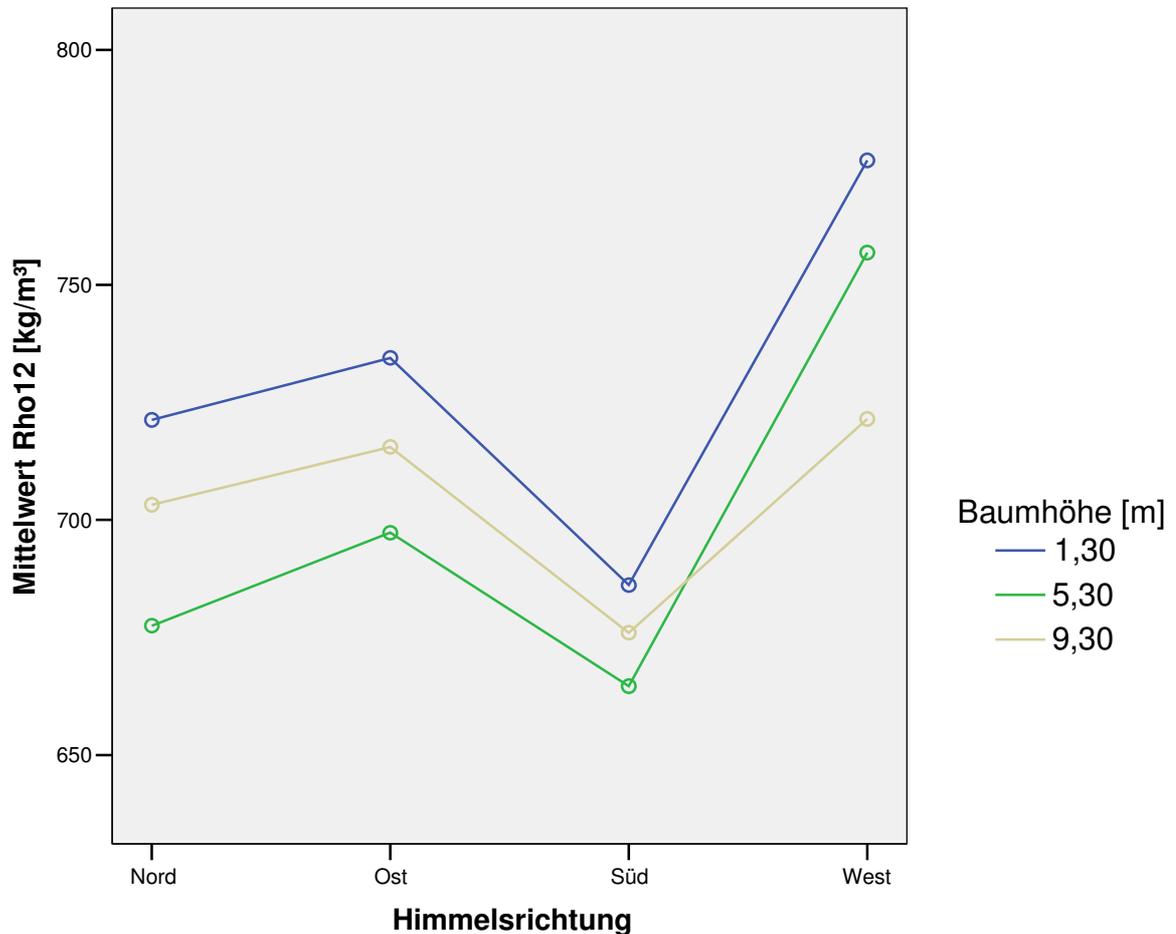


Abbildung 82: Buche Nr. 36 – mittlere Rohdichte [rho12] in drei verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen

Abbildung 82 zeigt die mittlere Rohdichte [rho12] in den drei untersuchten Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen. Im Gegensatz zu der Rohdichte bei Buche Nr. 31 (s. Abb. 77) zeigt sich hier ein ausgeprägt ähnlicher Kurvenverlauf in allen drei Baumhöhen. Sie nehmen jeweils in der Westrichtung den höchsten Wert an. Die niedrigsten Werte liegen in der Südrichtung. Bis auf den Werten in der Nord- und Südrichtung in 5,3 [m] Baumhöhe liegen alle anderen Werte über 680 [kg/m³], d. h. dem in der Literatur angegebenen Mittelwert für die Buche. Die höchsten Rohdichtemittelwerte liegen alle in 1,3 [m] Baumhöhe.

Buche 36

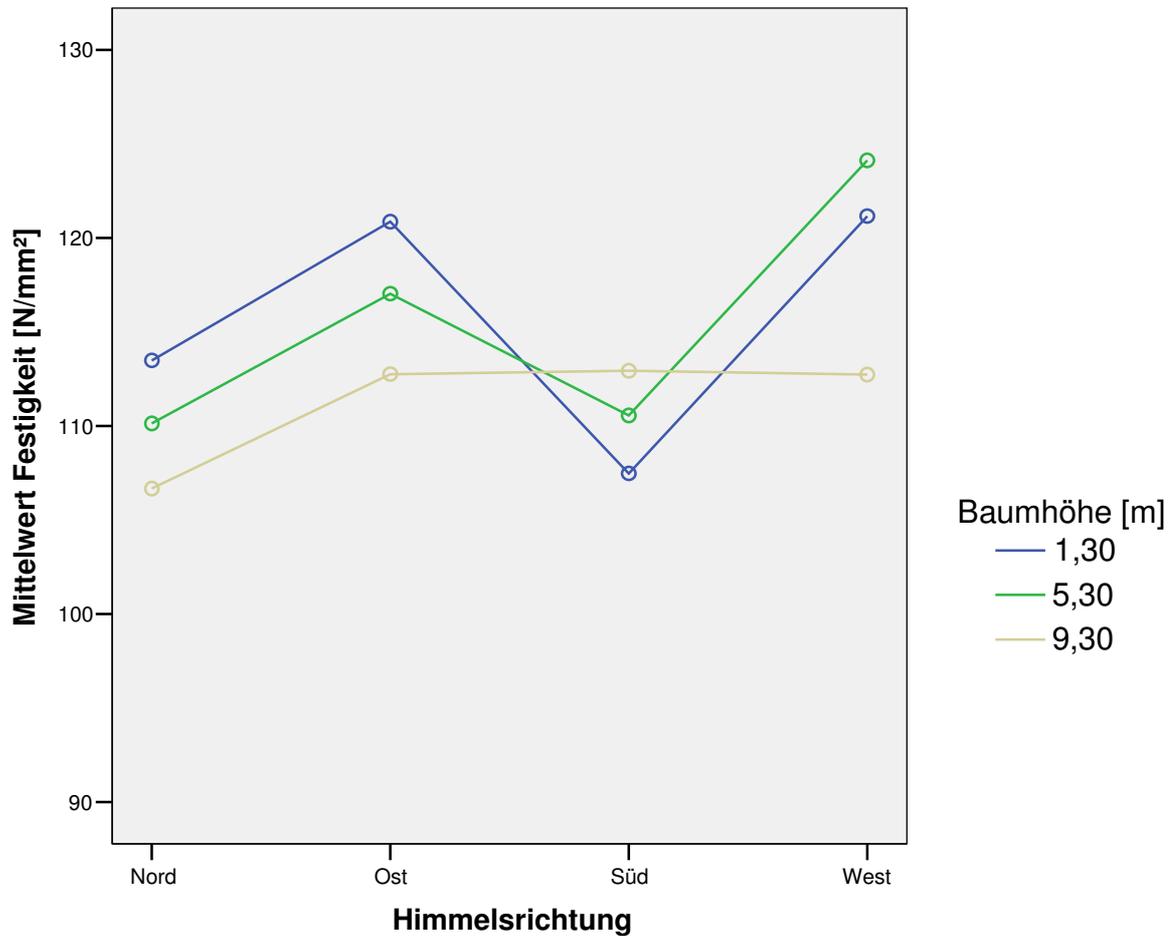


Abbildung 83: Buche Nr. 36– mittlere Biegefestigkeit in drei verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen

Abbildung 83 zeigt die mittlere Festigkeit von Buche Nr. 36 in den drei untersuchten Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen. Die Baumhöhen 1,3 [m] und 5,3 [m] zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf. Die oberste Baumhöhe in 9,3 [m] weicht deutlich von den anderen beiden ab. Wie bei der Rohdichte (s. Abb. 82) zeigt sich in den Baumhöhen 1,3 [m] und 5,3 [m] der niedrigste Wert in Süd-, der höchste in Westrichtung.

Buche 36

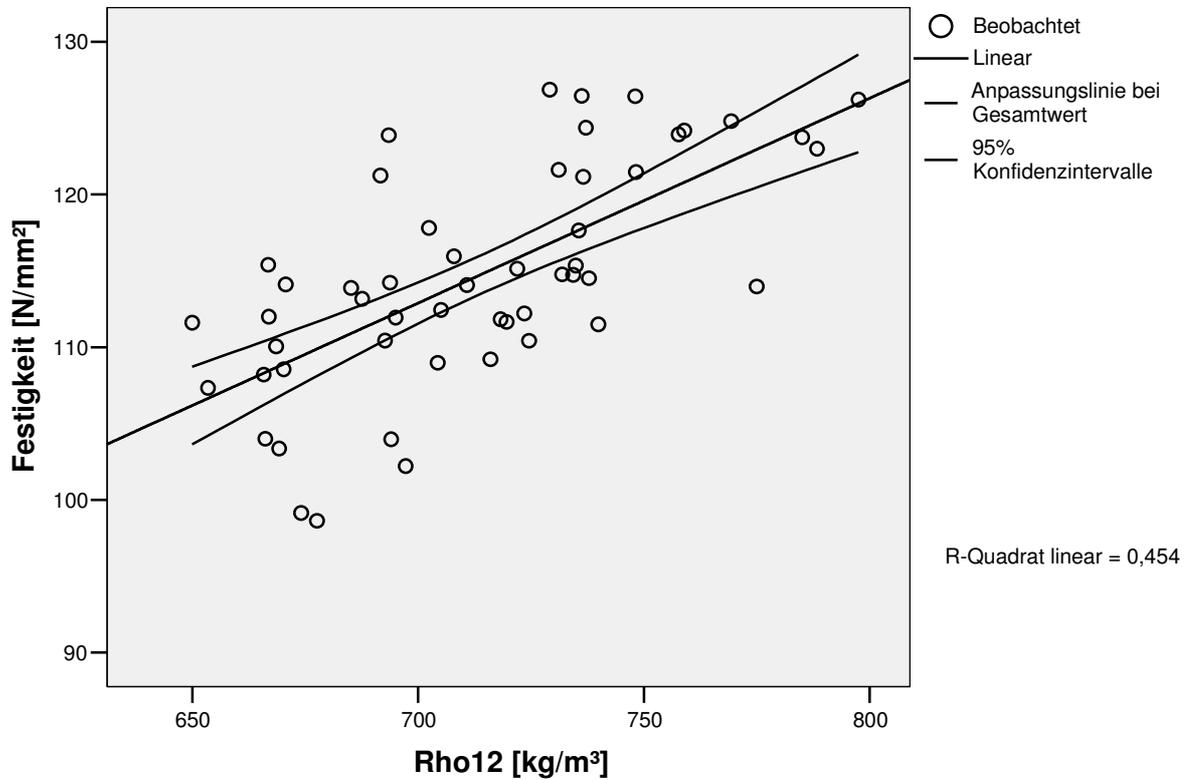


Abbildung 84: Buche Nr. 36 - Streudiagramm von Biegefestigkeit [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 32: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 84 sowie das Signifikanzniveau.

y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho12 [kg/m ³]	0,134	0,021	0,674	0,000
(Konstante)	18,990	14,855		0,207

In Abbildung 84 wird der Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Biegefestigkeit [N/mm²] bei der Buche Nr. 36 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß [R²] von 0.454 unterscheidet sich signifikant von 0,00. Die Biegefestigkeit wird zu 45% von der Rohdichte und zu einem höheren Anteil als bei dem Baum Nr. 31 (16%; s. Abb. 79) beeinflusst.

Buche 36

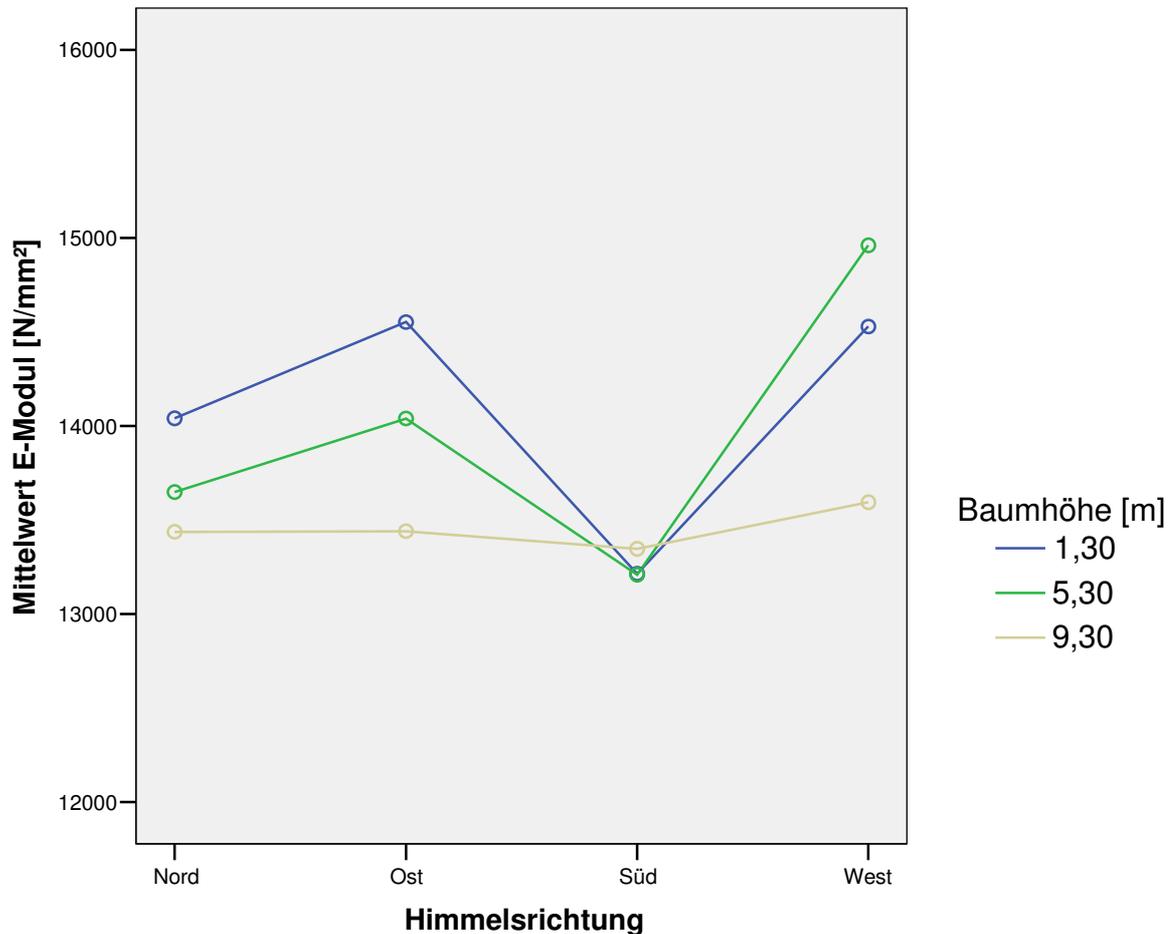


Abbildung 85: Buche Nr. 36 – mittlerer Biege-E-Modul [N/mm²] in drei verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen

Abbildung 85 zeigt den mittleren Biege-E-Modul für Buche Nr. 36 in den drei untersuchten Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen. Wie bei der Rohdichte (Abb. 82) und Biegefestigkeit (Abb. 83) zeigen die Baumhöhen 1,3 [m] und 5,3 [m] einen ähnlichen Kurvenverlauf. Die Baumhöhe 9,3 [m] weicht hiervon deutlich ab. Ebenfalls wie bei den beiden erstgenannten physikalischen Kenngrößen zeigt sich hier in der untersten und mittleren Baumhöhe der niedrigste Wert in Süd-, der höchste in Westrichtung.

Buche 36

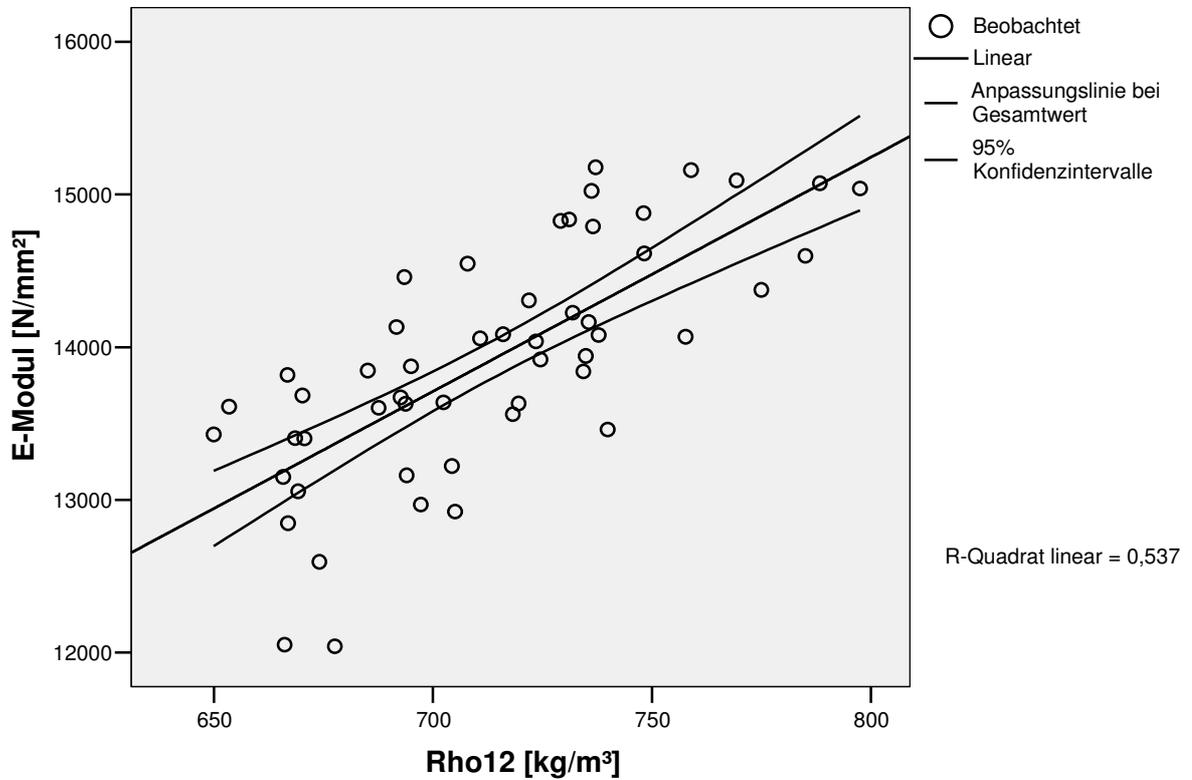


Abbildung 86: Buche Nr. 36 - Streudiagramm Biege-E-Modul [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 33: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 86 sowie das Signifikanzniveau.

y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho12 [kg/m³]	15,335	2,015	0,733	0,000
(Konstante)	2975,775	1439,396		0,044

Abbildung 86 zeigt den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den Biege-E-Modul [N/mm²] bei Buche Nr. 36. Das Bestimmtheitsmaß [R²] von 0.537 unterscheidet sich signifikant von 0,00. Der E-Modul wird zu einem größeren Teil von der Rohdichte beeinflusst als bei Baum Nr. 31 (27%; s. Abb. 81). Die Rohdichte beeinflusst den E-Modul stärker als die Biegefestigkeit (45%; s. Abb. 84).

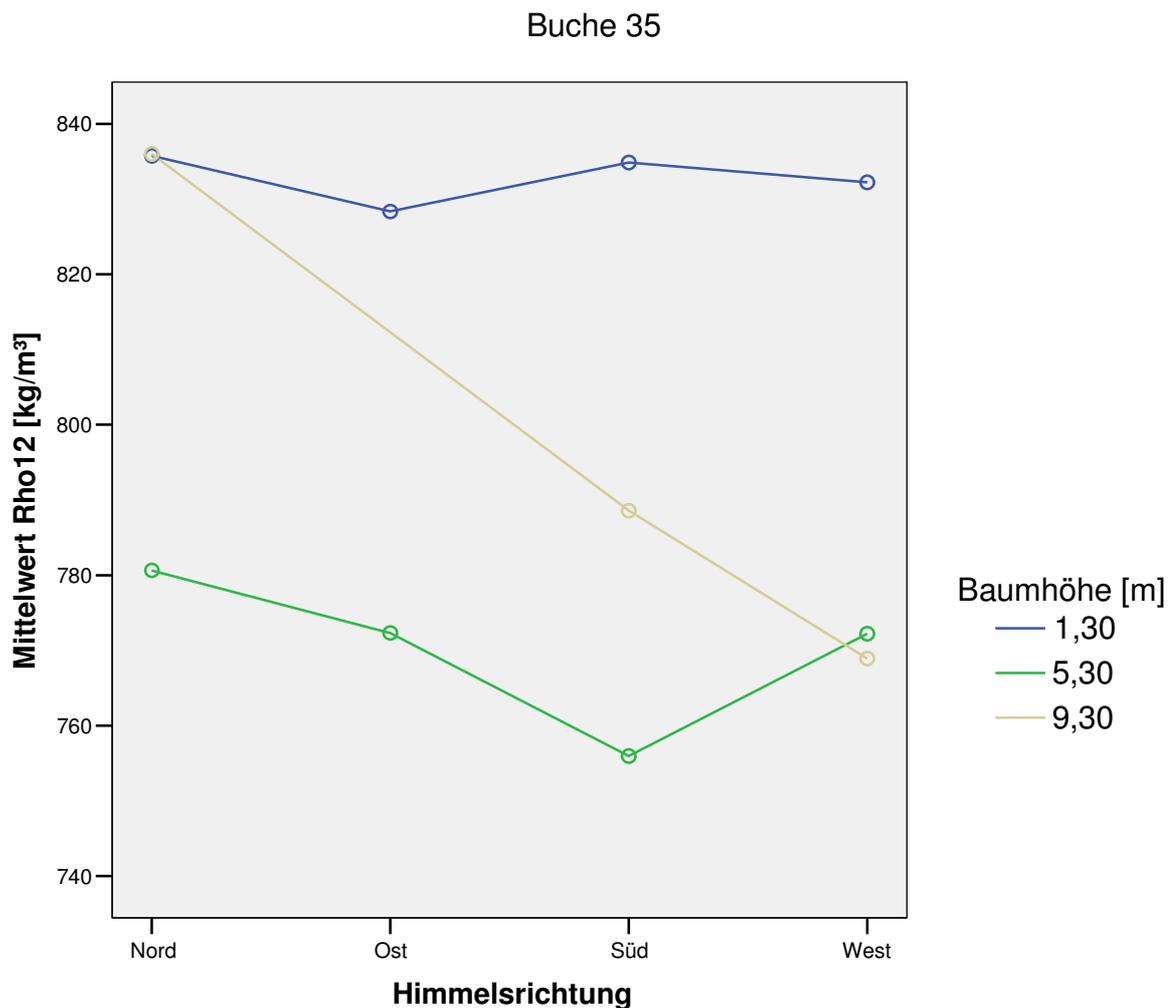


Abbildung 87: Buche Nr. 35 – mittlere Rohdichte [rho12] in drei verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen

Abbildung 87 zeigt die mittlere Rohdichte [rho12] der Buche Nr. 35 in den drei untersuchte Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen. In Baumhöhe 9,3 [m] fehlt der Wert für die Ostrichtung. Wegen eines dort liegenden Astes konnten keine Prüfkörper ausgeformt werden.

Die Kurvenverläufe aller drei Baumhöhen weichen deutlich voneinander ab. Die höchste Rohdichte liegt in der Stammbasis bei 1,3 [m] Baumhöhe. Die niedrigsten Werte liegen in 5,3 [m] Stammhöhe. Alle Werte liegen deutlich über 680 [kg/m³], d. h. dem in der Literatur für die Buche angegebenen Mittelwert.

Buche 35

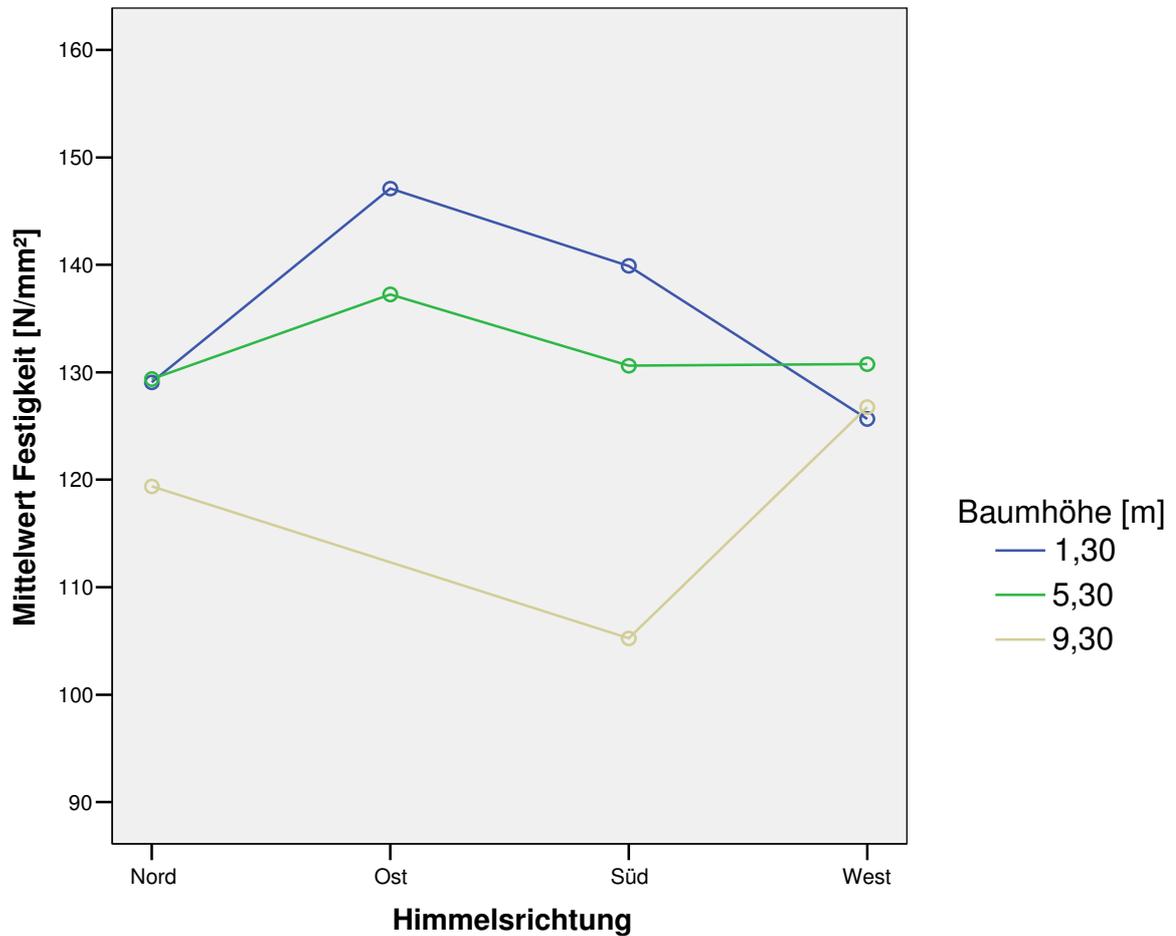


Abbildung 88: Buche Nr. 35 – mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] in drei verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen

Die mittlere Biegefestigkeit [N/mm²] in den drei untersuchten Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen zeigt Abbildung 88. Der Wert der Ostrichtung fehlt (s. Erklärung Abb. 87). Die niedrigsten Biegefestigkeitswerte sind in der Baumhöhe von 9,3 [m].

Buche 35

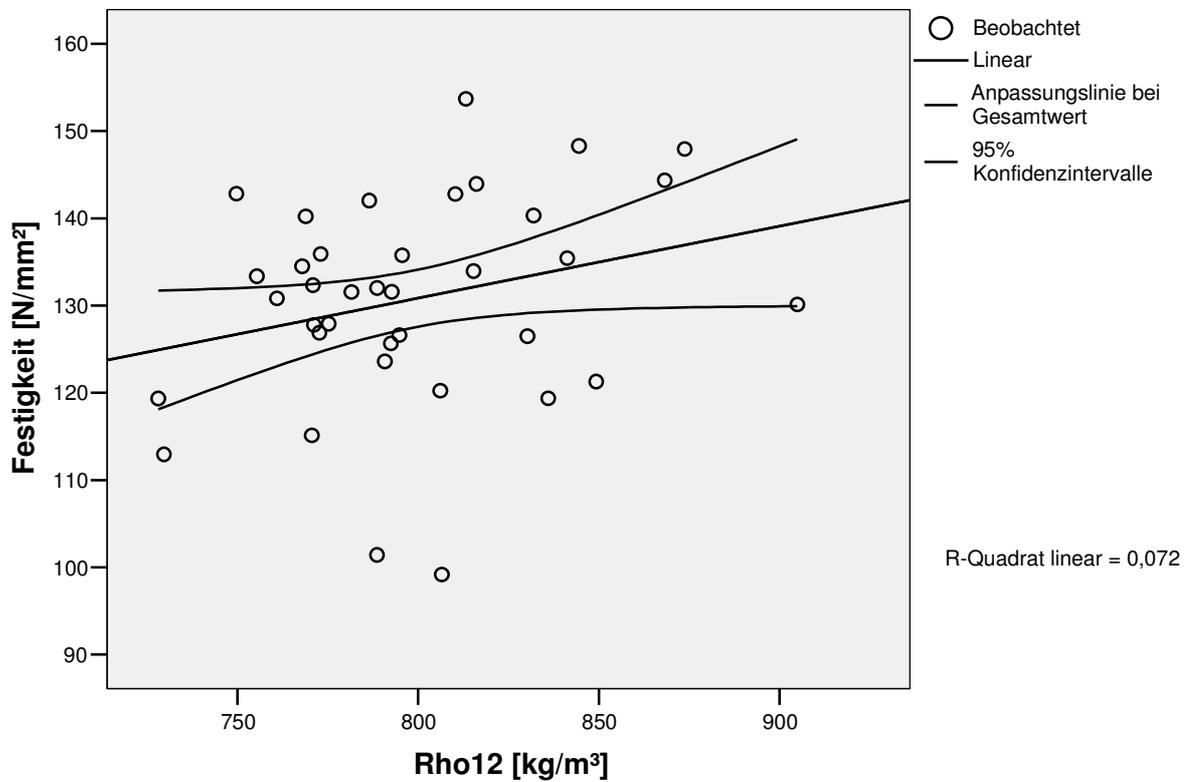


Abbildung 89: Buche Nr. 35 - Streudiagramm von Biegefestigkeit [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 34: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 89 sowie das Signifikanzniveau.

y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho12 [kg/m ³]	0,082	0,050	0,268	0,109
(Konstante)	64,898	40,091		0,114

In Abbildung 89 wird der Einfluss der Rohdichte [rho12] auf die Biegefestigkeit [N/mm²] bei der Buche Nr. 35 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß [R²] von 0.0717 unterscheidet sich signifikant von 0,11 und zeigt sehr deutlich, dass die Festigkeit keinen Einfluss durch die Rohdichte erfährt, im Gegensatz zu den beiden anderen untersuchten Einzelbäumen (s. Abb. 79 und s. Abb. 84).

Buche 35

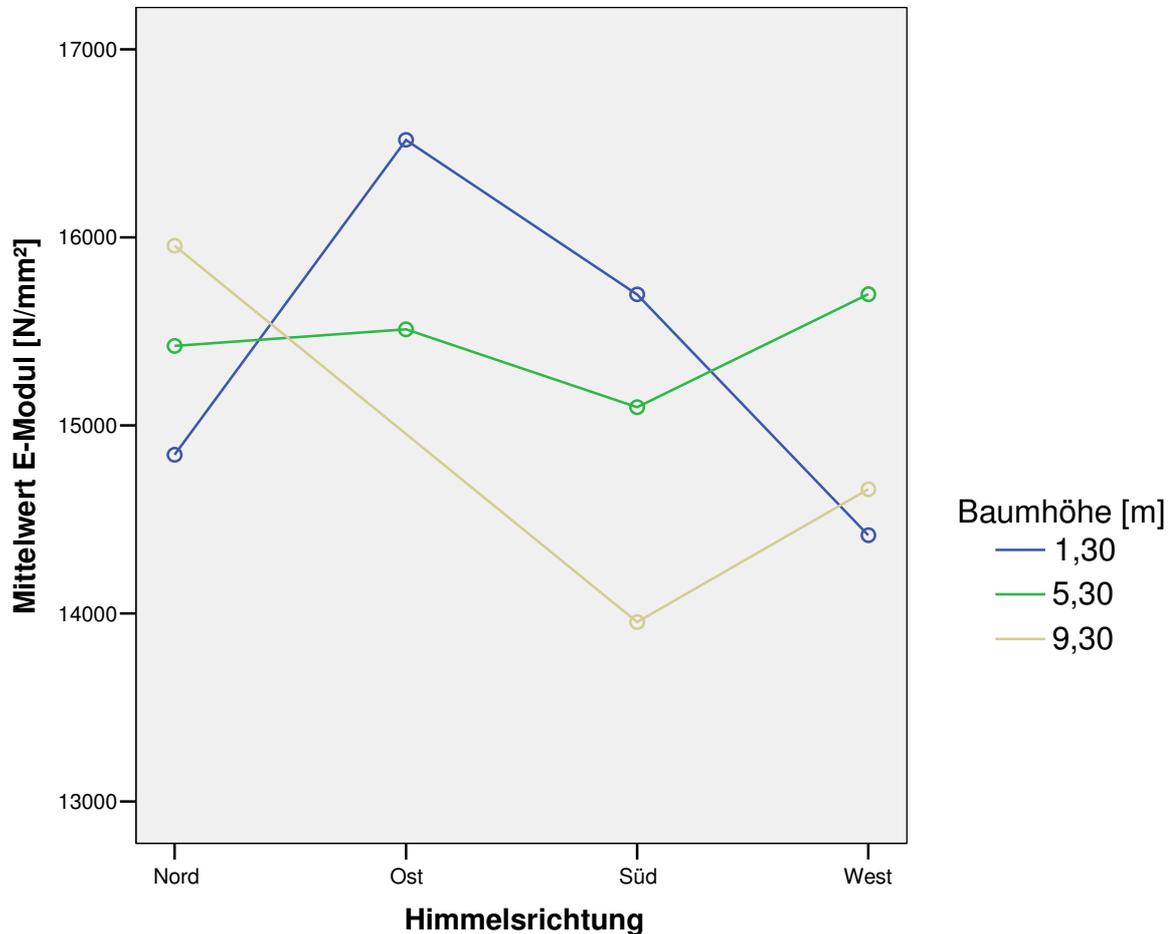


Abbildung 90: Buche Nr. 35 – mittlerer Biege-E-Modul [N/mm²] in drei verschiedenen Baumhöhen über den vier Haupthimmelsrichtungen

Der mittlere Biege-E-Modul der Buche Nr. 35 in den drei untersuchten Baumhöhen über den Haupthimmelsrichtungen zeigt Abbildung 90. In der Baumhöhe 9,3 [m] fehlt der Wert für die Ostrichtung. Wegen eines dort liegenden Astes konnten keine Prüfkörper ausgeformt werden. Die Kurven der drei Baumhöhen weichen wie bei der Rohdichte (Abb. 87) und Biegefestigkeit (Abb. 88) deutlich voneinander ab.

Buche 35

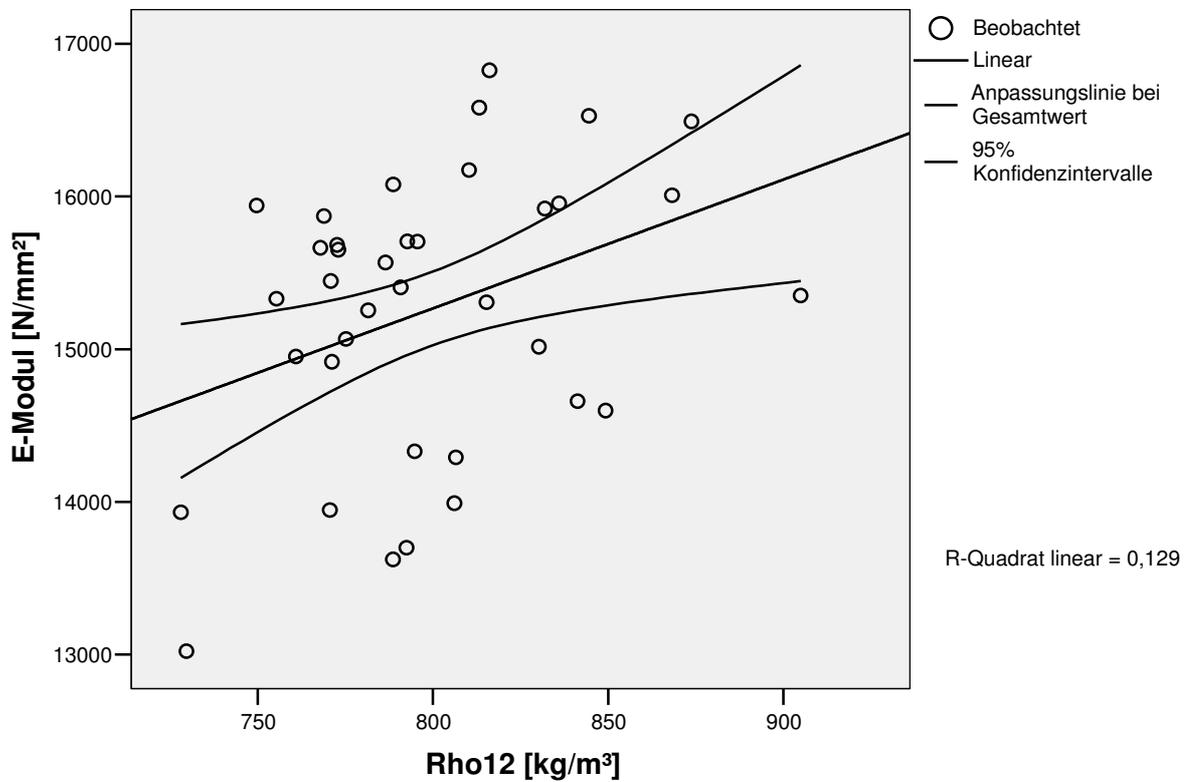


Abbildung 91: Buche Nr. 35 - Streudiagramm Biege-E-Modul [N/mm²] über Rohdichte [rho12].

Tabelle 35: Formel für die Berechnung der Regressionsgeraden in Abb. 91 sowie das Signifikanzniveau.

y = a + bx	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Signifikanz
	B	Standardfehler	Beta	
Rho12 [kg/m ³]	8,433	3,701	0,359	0,029
(Konstante)	8520,818	2959,605		0,007

Abbildung 91 zeigt den Einfluss der Rohdichte [rho12] auf den E-Modul der Buche Nr. 35. Das Bestimmtheitsmaß [R²] von 0.129 unterscheidet sich signifikant von 0,03 und zeigt, dass hier der E-Modul sehr gering (12%) von der Rohdichte im Gegensatz zu den beiden anderen dargestellten Einzelbäumen (Abb. 81 und Abb. 86) beeinflusst wird. Einen noch geringeren Einfluss zeigte die Rohdichte bei diesem Baum auf die Biegefestigkeit (Abb. 89).

4.6 Computertomographische Aufnahmen an Buche

4.6.1 Innere Astigkeit

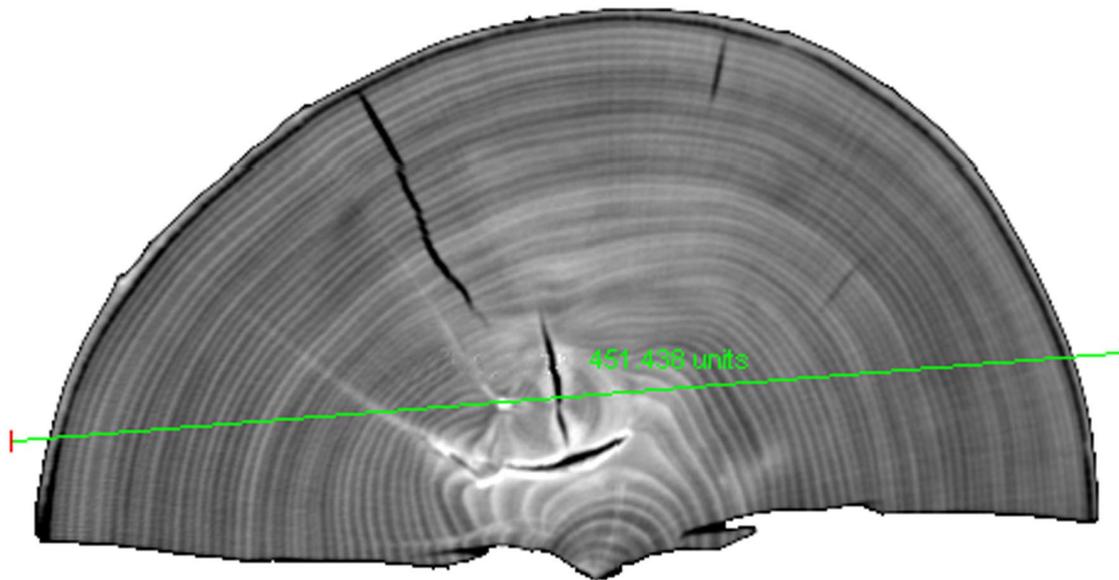


Abbildung 92: BUc 2100_6T, Axialschnitt Nr. 30 mit Ast, Rotkern und Messachse für die Dichteprofilbestimmung.

Die Abbildung 92 zeigt den Axialschnitt Nr. 30 des Prüfkörpers BUc2100_6T. In der Aufnahme sieht man den Holzkörper und die Messachse für die Dichteprofilbestimmung. Im Holzkörper erkennt man die Jahrringstruktur, Risse, einen eingewachsenen Ast, der in seinem Zentrum ebenfalls einen Riss hat. Die Messachse verläuft quer durch den Prüfkörper. Sie läuft durch den eingewachsenen Ast oberhalb der Markröhre und schneidet die Rinde an beiden Seiten.

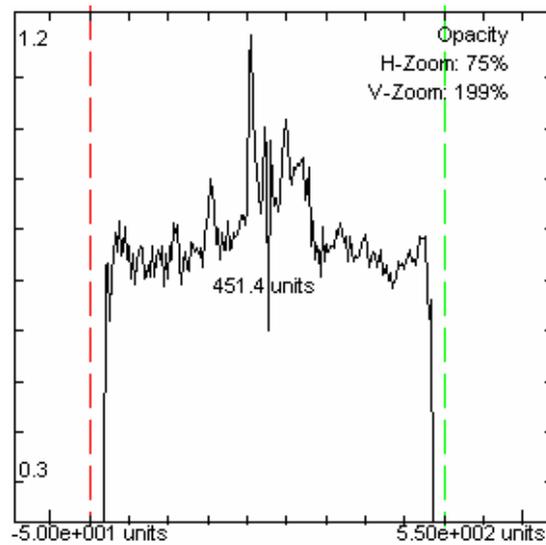


Abbildung 93: BUC 2100_6T, Dichteprofil von Axialschnitt Nr. 30.

Abbildung 93 zeigt das Dichteprofil des Axialschnitts Nr.30 des Prüfkörpers Buc2100_6T. Der Anstieg der Kurve zur Mitte ist auf den eingewachsenen Ast zurückzuführen. Sein Riss ist durch den Kurvenabfall in der Mitte zu erkennen. Die beiden schwächer ausgeprägten Peaks markieren die beiden Stränge erhöhter Dichte.

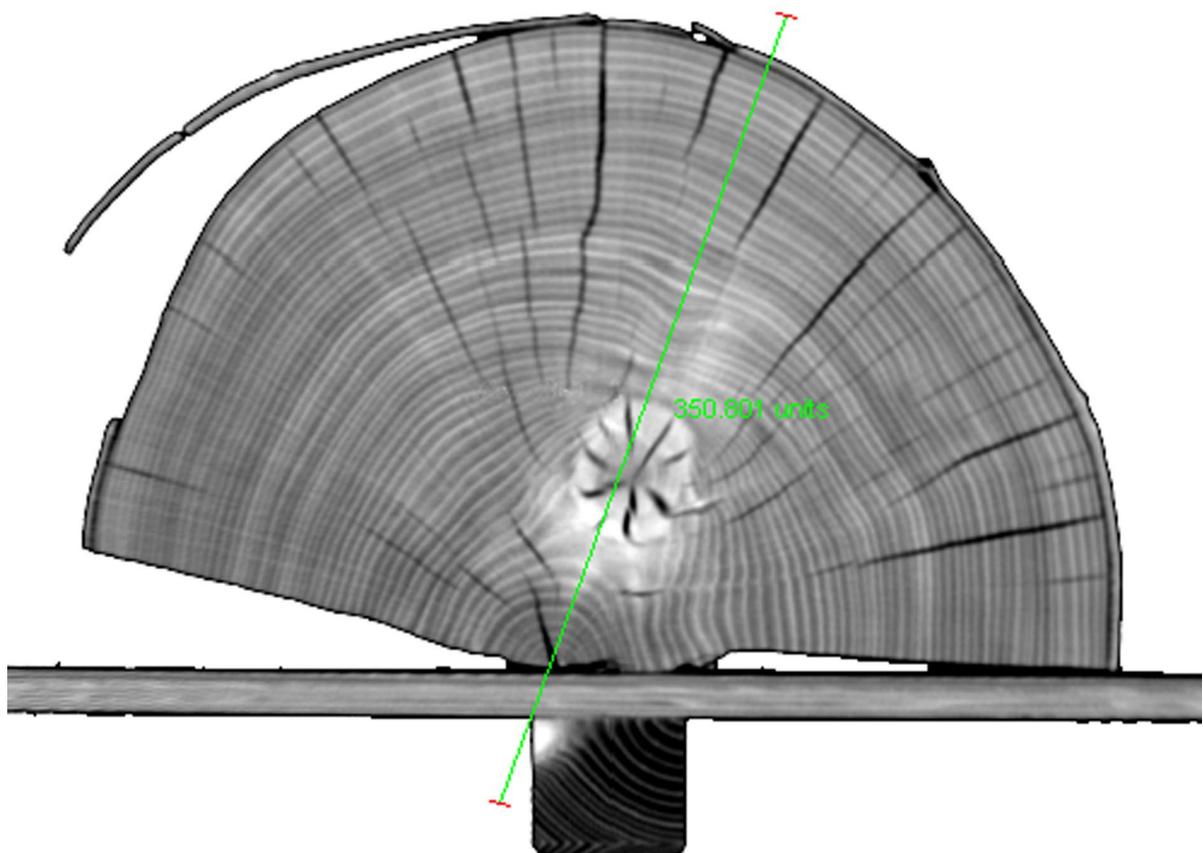


Abbildung 94: BUd 2100_6T, Axialschnitt Nr. 34 mit Ast und Messachse für die Dichteprofilbestimmung.

Die Abbildung 94 zeigt den Axialschnitt Nr. 34 des Prüfkörpers BUd2100_6T. In der Aufnahme sieht man die Patientenliege des Aufnahmeapparates sowie den Holzkörper und die Messachse für die Dichteprofilbestimmung. Im Holzkörper erkennt man die Jahrringstruktur, Risse, einen eingewachsenen Ast, der in seinem Zentrum kreuzförmige Risse hat. Die Rinde ist z. T. vom Holzkörper getrennt. Die Messachse verläuft radial durch den Prüfkörper. Sie läuft durch die Patientenliege des Aufnahmeapparates, die Markhöhle, den eingewachsenen Ast und durch die Rinde.

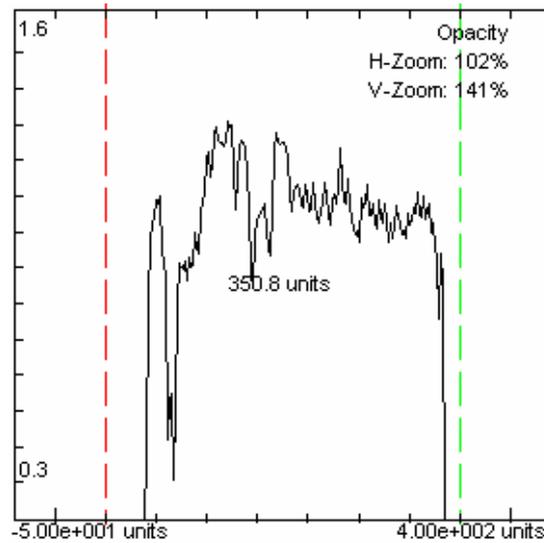


Abbildung 95: BUd 2100_6T, Dichtprofil von Axialschnitt Nr. 34.

Abbildung 95 zeigt das Dichteprofil des Axialschnitts Nr.34 des Prüfkörpers BUd2100_6T. Die Kurve von links nach rechts entspricht der Messachse beginnend von der Patientenliege radial durch die Markröhre des Prüfkörpers verlaufend. Der Anstieg der Kurve zu Beginn ist auf den eingewachsenen Ast, der relativ marknah im Holzkörper liegt, zurückzuführen. Seine kreuzförmigen Risse sind durch die Kurvenabfälle im erhöhten Kurvenbereich gekennzeichnet. Der erste Kurvenabfall wird von dem Hohlraum zwischen der Patientenliege und dem Holzkörper verursacht.

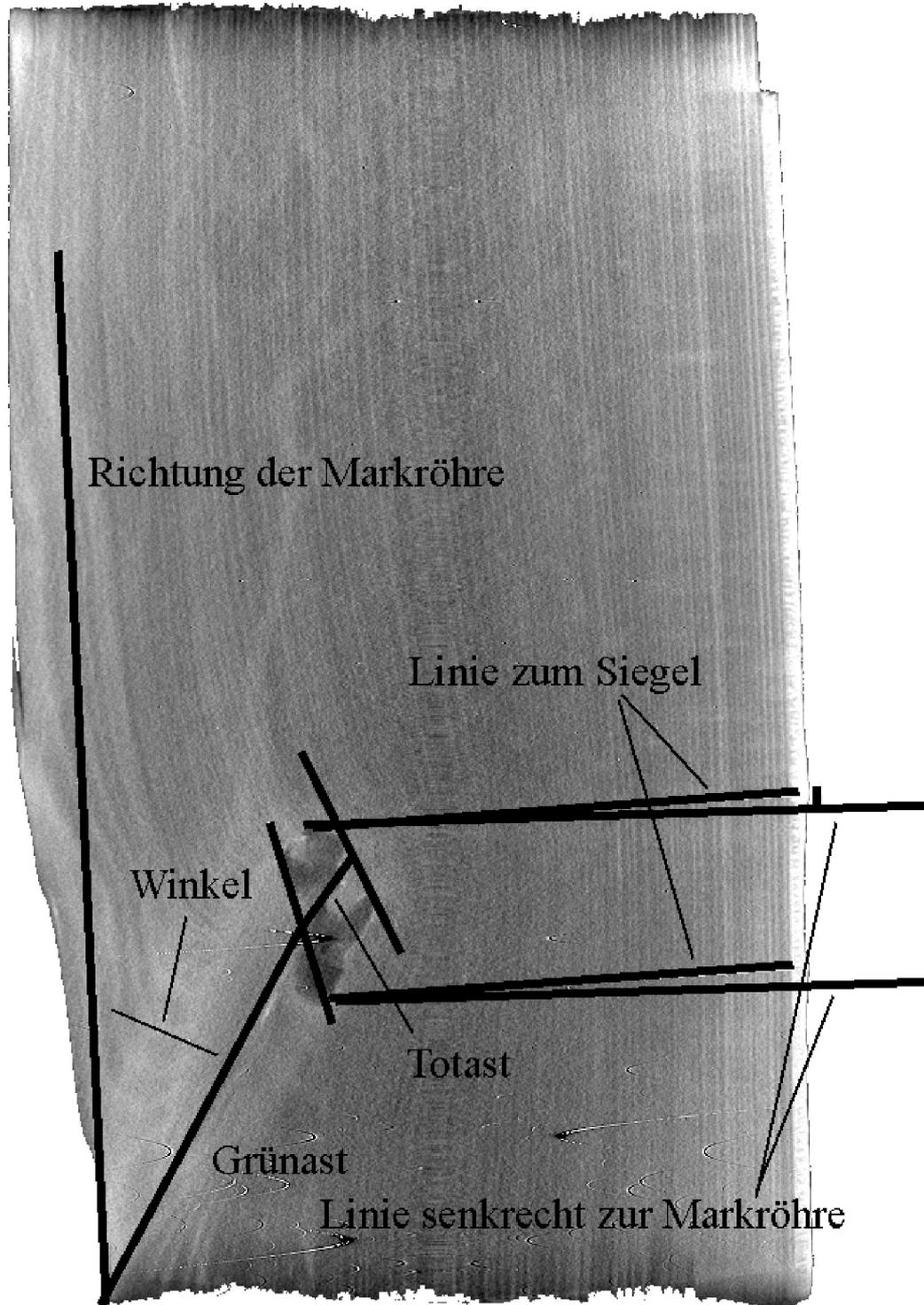


Abbildung 96: BU297_6T, Sagittalschnitt Nr. 527 mit Ast und Beschriftungen.

Abbildung 96 zeigt den Sagittalschnitt des Prüfkörpers BU297_6T. In der Aufnahme ist ein eingewachsener Ast abgebildet. Der Grünast- sowie der Totastbereich sind deutlich zu erkennen. Im Holzkörper ist die Jahrringstruktur sowie die Rinde zu unterscheiden. Auf der Aufnahme sind verschiedene Beschriftungen, die gemessene Größen darstellen, enthalten. Diese gemessenen Strecken und Winkel

sind die Grundlage für die Erfassung der Inneren Astigkeit in dieser Arbeit und entsprechen dem Mess-Schema, welches für die innere Astigkeit der Fichte angewendet wurde (s. 3.5.1).

4.6.2 Mondkrater



Abbildung 97: BU57_4T, Prüfkörper mit Mondkrater und erkennbare Verletzung im Holzkörper.

Abbildung 97 zeigt den Prüfkörper BU57_4T. Die Rinde ist zu erkennen, die z. T. fehlt. Im Rindenbild sind zwei Chinesenbärte, ein Riss sowie ein Mondkrater abgebildet. Im Holzkörper sind Risse, ein eingewachsener Ast und eine Verletzung, die von einer hellen Zone umgeben ist, zu sehen. Die im Holzkörper liegende Verletzung ist der Ursprung für den Mondkrater, der in der Rinde abgebildet ist. Die Jahrringstruktur ist nur z. T. deutlich zu erkennen.

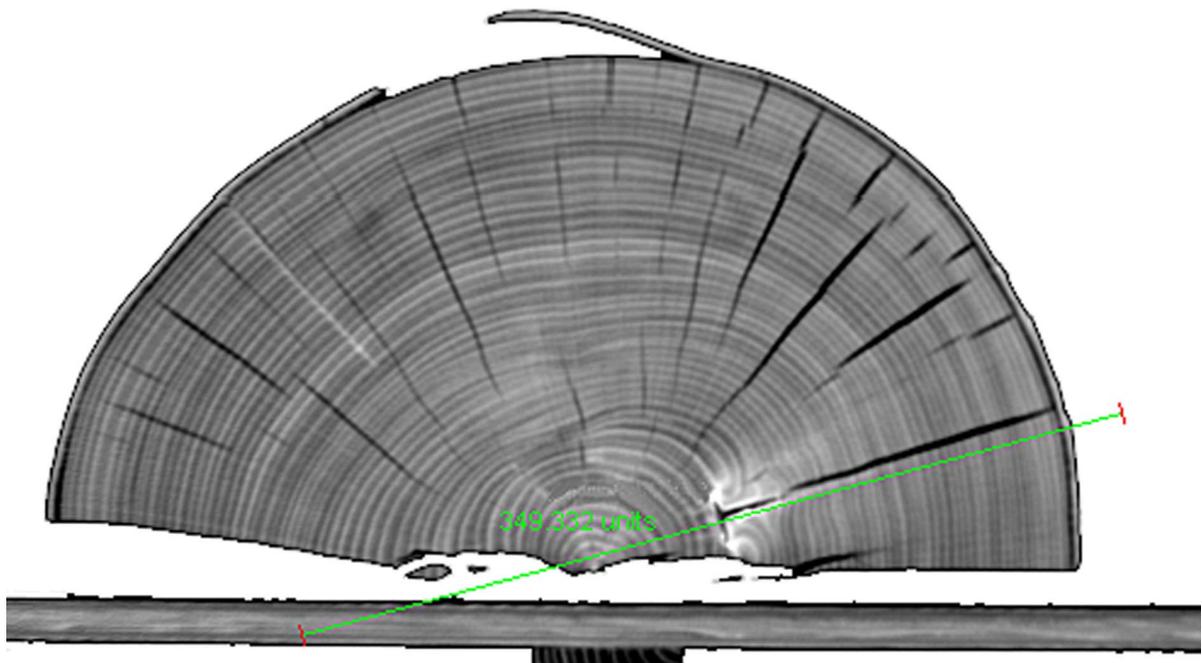


Abbildung 98: BUc 2100_6T, Axialschnitt Nr. 58 mit Verletzung (Ursprung vom Mondkrater) und Messachse für die Dichteprofilbestimmung.

Die Abbildung 98 zeigt den Axialschnitt Nr. 58 des Prüfkörpers BUc2100_6T. In der Aufnahme sieht man die Patientenliege des Aufnahmeapparates sowie den Holzkörper und die Messachse für die Dichteprofilbestimmung. Im Holzkörper erkennt man die Jahrringstruktur, Risse, eine Verletzung, die in ihrem Zentrum ebenfalls Risse hat. Die Rinde ist z. T. vom Holzkörper getrennt. Die Messachse verläuft radial durch den Prüfkörper. Sie läuft durch die Patientenliege des Aufnahmeapparates, die Markhöhle, die Verletzung und die Rinde.

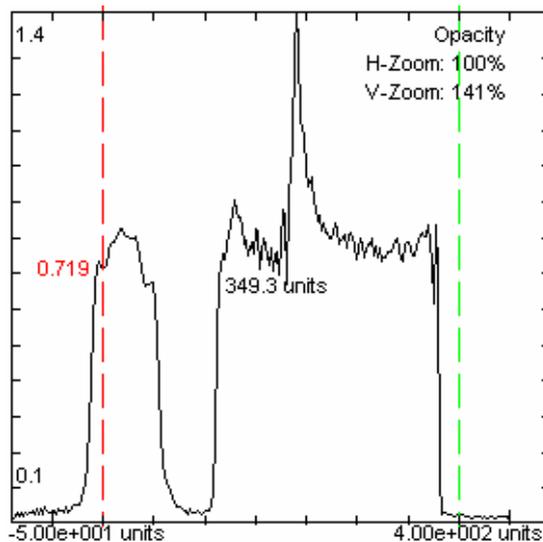


Abbildung 99: BUc 2100_6T, Dichteprofil von Axialschnitt Nr. 58.

Abbildung 99 zeigt das Dichteprofil des Axialschnitts Nr. 58 des Prüfkörpers BUc2100_6T. Die Kurve von links nach rechts entspricht der Messachse beginnend von der Patientenliege radial durch die Markröhre durch den Prüfkörper verlaufend. Der erste Abschnitt der Kurve ist der Dichtebereich der Patientenliege. Der erste Kurvenabfall ist von dem Hohlraum zwischen der Patientenliege und dem Holzkörper verursacht worden. Der steile Peak in der Kurve des Holzkörpers spiegelt die helle Zone um die Verletzung, d. h. deren höhere Dichte im Holzkörper wieder.

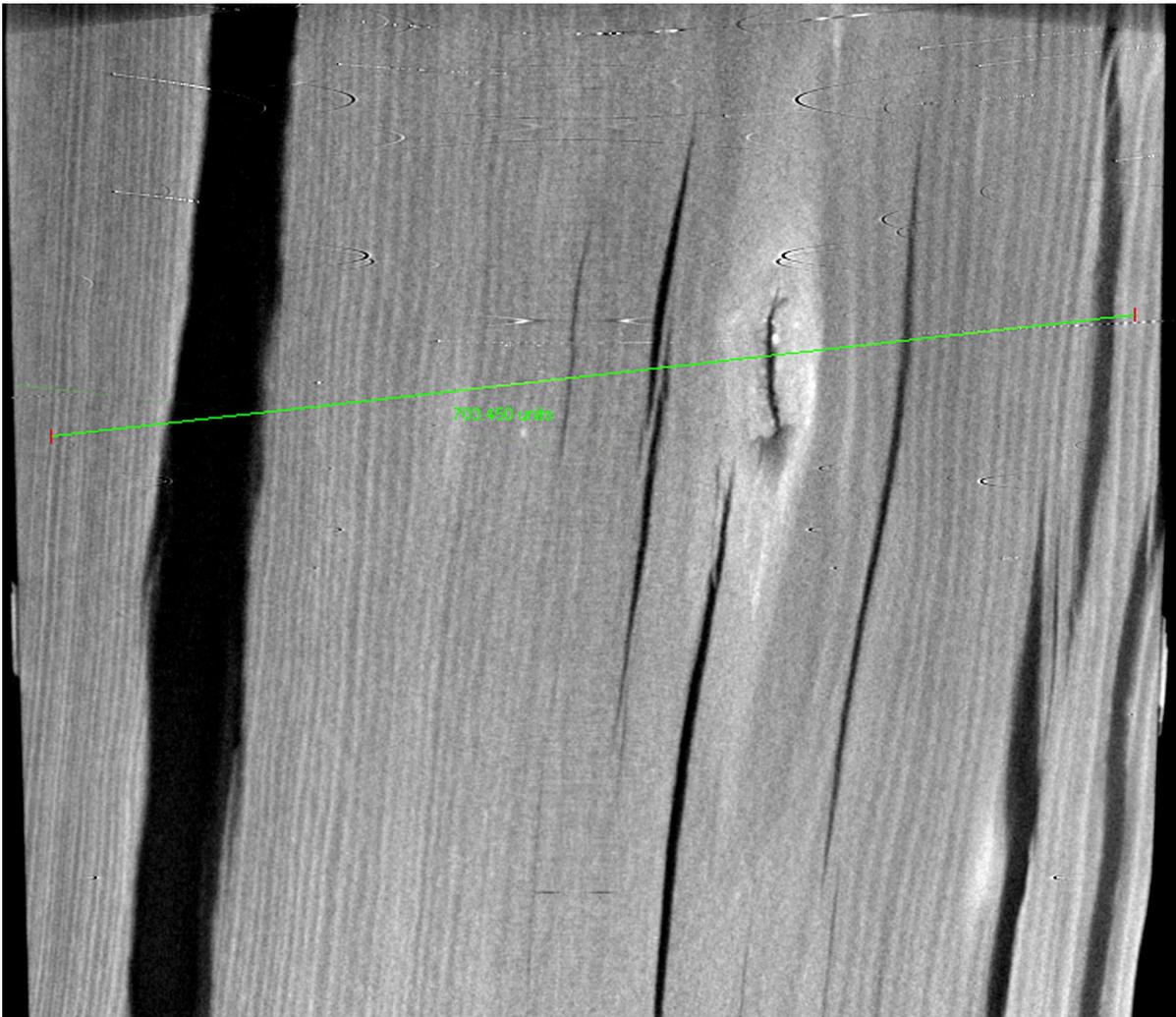


Abbildung 100: BU166_4T, Sagittalschnitt Nr. 718 mit Mondkrater und Messachse zur Dichteprofilbestimmung.

Abbildung 100 zeigt den Sagittalschnitt Nr.718 durch den Prüfkörper BU166_4T. In der Abbildung wird eine im Holzkörper liegende Verletzung angeschnitten. Sie ist von einer helleren Zone, die auf eine höhere Dichte zurückzuführen ist, umgeben. Die Jahrringstruktur des Holzkörpers ist zu erkennen. Die grüne Messachse dient zur Bestimmung eines Dichteprofiles und verläuft direkt durch den Prüfkörper und seine Verletzung durch.

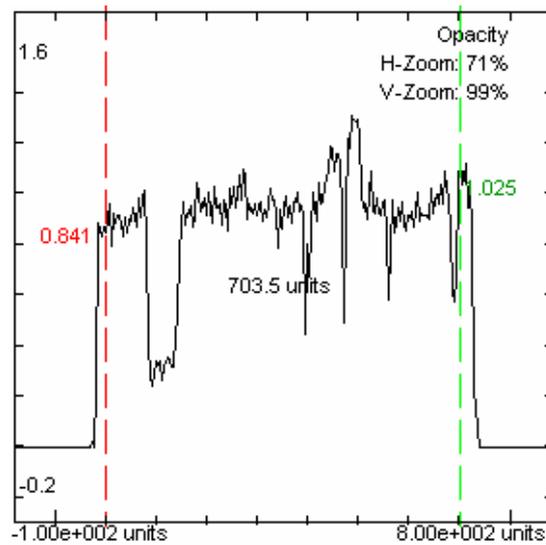


Abbildung 101: BU166_4T, Dichteprofil von Sagittalschnitt Nr. 718.

Abbildung 101 zeigt das Dichteprofil des Axialschnitts Nr. 718 des Prüfkörpers BUc2100_6T. Der erste Kurvenabfall ist auf den breiten Riss im Holzkörper zurückzuführen. Der hohe Peak in der Kurve des Holzkörpers spiegelt die helle Zone um die Verletzung, d. h. deren höhere Dichte im Holzkörper wieder. Der Riss, welcher in der Verletzung erkennbar ist, wird durch einen deutlichen Kurvenabfall wiedergespiegelt.

4.6.3 Rotkern

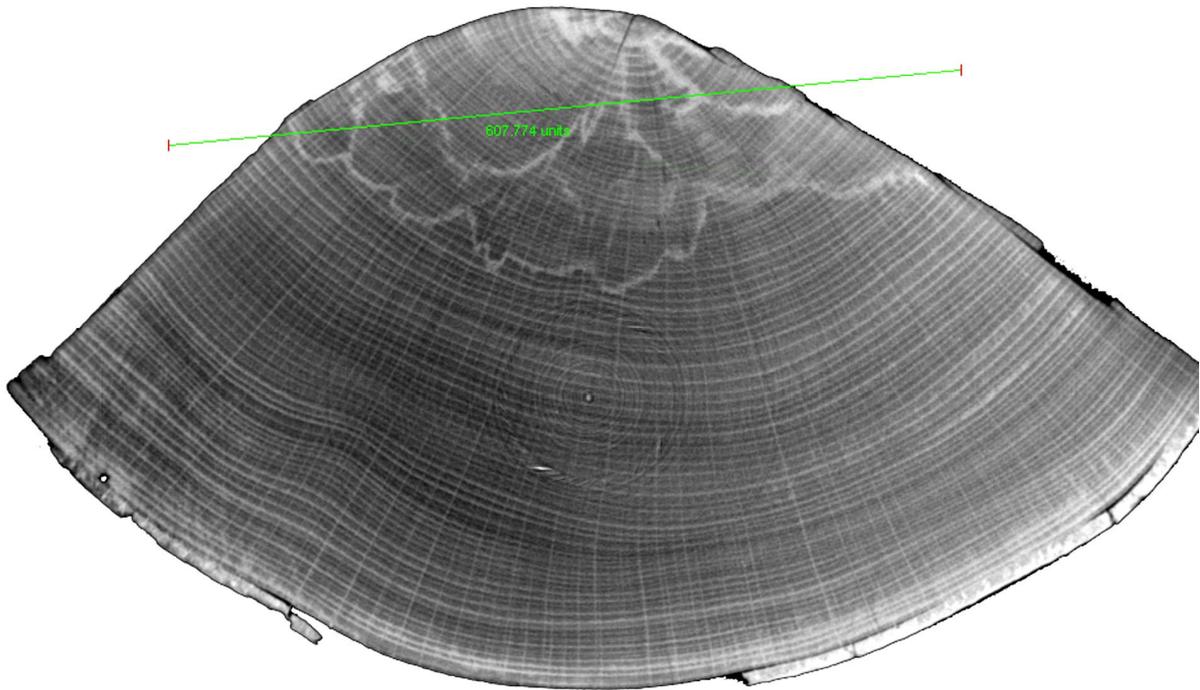


Abbildung 102: BU297_6T, Axialschnitt Nr. 19a mit Messachse zur Dichteprofilbestimmung.

Abbildung 102 zeigt den Axialschnitt Nr. 19a des Prüfkörpers BU297_6T. In der Aufnahme sind der Holzkörper, seine Jahrringstruktur, der wellige Grenzverlauf des Rotkerns, die Rinde, die z. T. fehlt und die grüne Messachse für die Ermittlung eines Dichteprofiles enthalten. Die Messachse verläuft nur in dem der Markröhre nahen Bereich durch den Prüfkörper, um gezielt möglichst viele Rotkerngrenzen zu treffen. Der wellige Grenzverlauf des Rotkerns ist deutlich heller gegenüber dem restlichen Holz des Prüfkörpers abgebildet. Die Rinde zeigt Risse und ist an einer Stelle vom Holzkörper getrennt. Die Aufnahme enthält kreisrunde Artefakte im Zentrum.

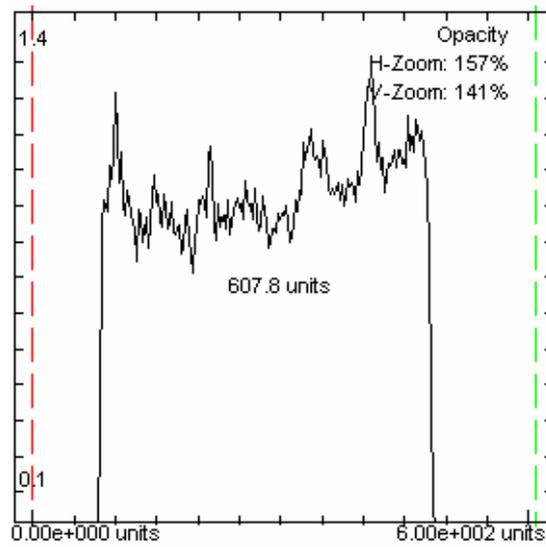


Abbildung 103: BU297_6T, Dichteprofil von Axialschnitt Nr. 19a.

Abbildung 103 zeigt das Dichteprofil des Axialschnittes Nr. 19a des Prüfkörpers BU297_6T. Die erhöhten Peaks in der Graphik sind auf die Grenzen des Rotkerns zurückzuführen (Anzahl 6).

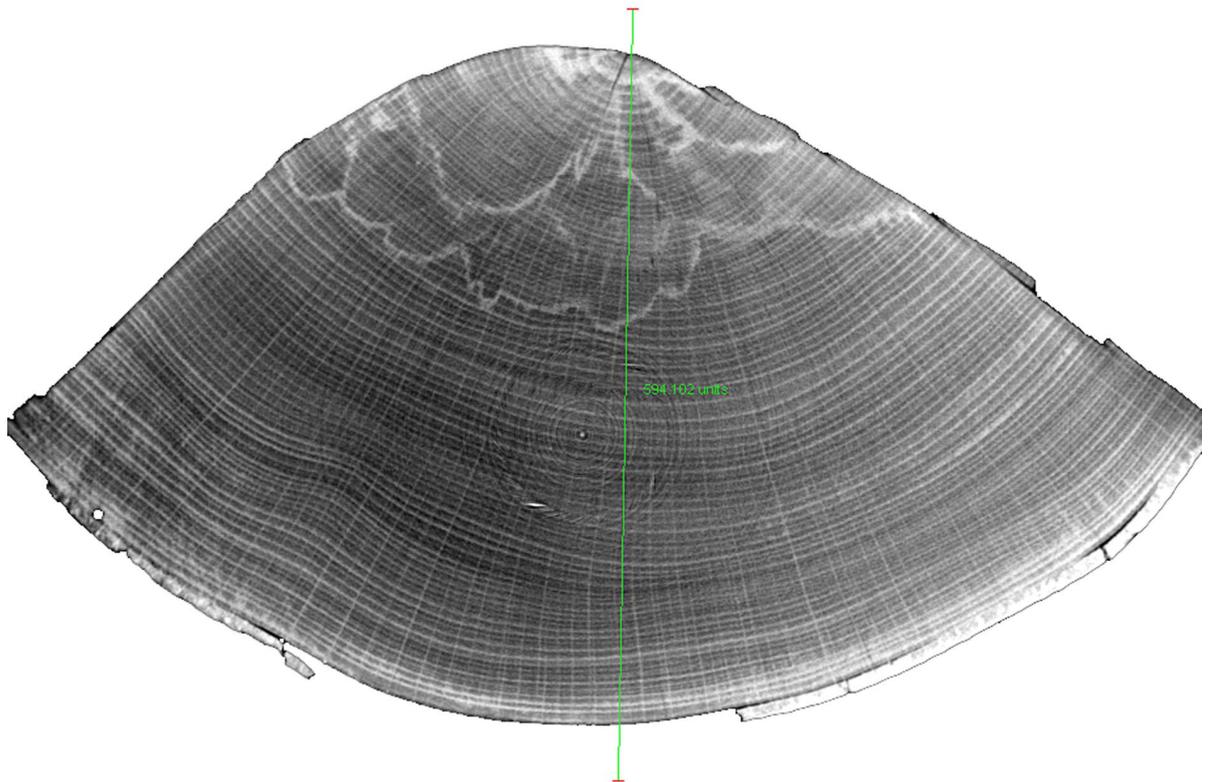


Abbildung 104: BU297_6T, Axialschnitt Nr. 19b mit Messachse zur Dichteprofilbestimmung.

Abbildung 104 zeigt die identische Aufnahme wie Abbildung 101, den Axialschnitt Nr. 19b des Prüfkörpers BU297_6T. Der einzige Unterschied ist der radiale Verlauf der Messachse durch den Prüfkörper und durch seine Markröhre.

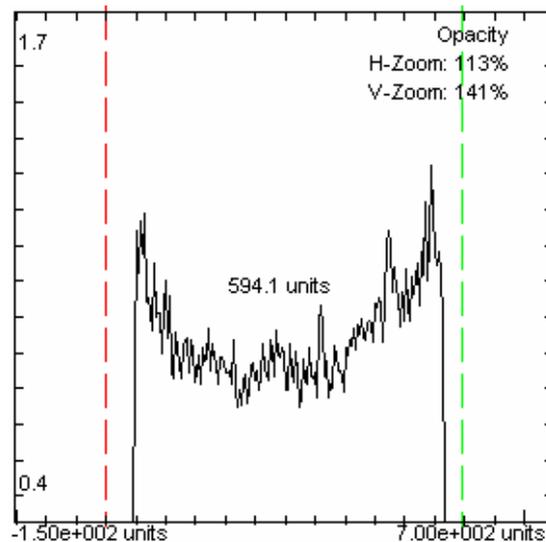


Abbildung 105: BU297_6T, Dichteprofil von Axialschnitt Nr. 19b.

Abbildung 105 zeigt das Dichteprofil, welches entlang der grünen Messachse vom Axialschnitt Nr. 19b des Prüfkörpers BU297_6T ermittelt wurde. Die Kurve von links nach rechts entspricht der Messachse beginnend von der Rinde bis zur Markröhre. Von der Rinde, die in etwa die gleiche Dichte wie der Bereich der Markröhre aufweist nimmt die Kurve stetig ab, um von der Mitte der Messstrecke wieder auf denselben Dichtewert anzusteigen, den die Rinde hat. Von der Mitte rechts in der Graphik sind zwei steile, höhere Peaks zu erkennen, die auf die Grenzen des Rotkerns zurückzuführen sind.

4.6.4 Besondere Merkmalsausprägungen im Rundholzkörper

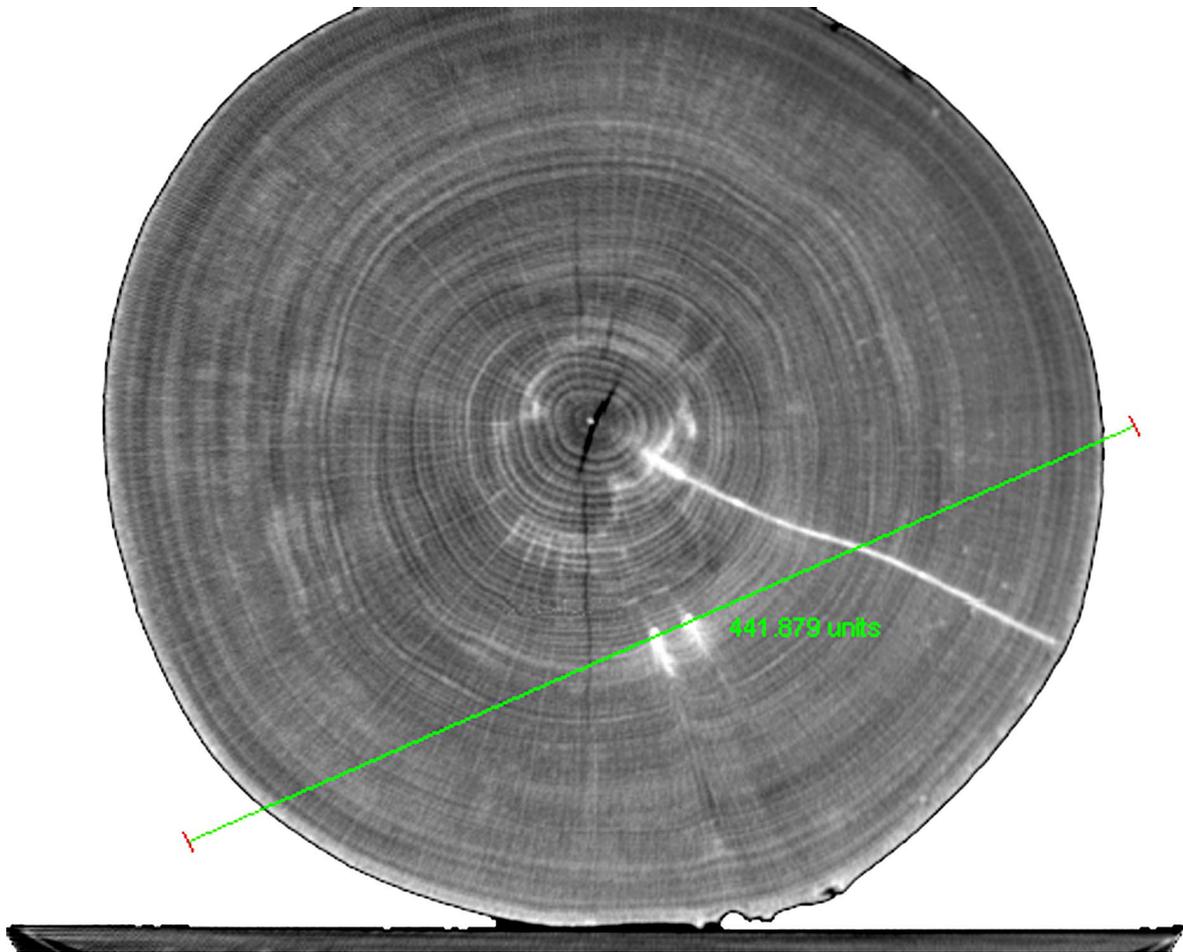


Abbildung 106 BU428_6T, Axialschnitt Nr. 38 mit Messachse zur Dichteprofilbestimmung.

Die Abbildung 106 zeigt den Axialschnitt Nr. 38 des Prüfkörpers BU428_6T. In der Aufnahme sieht man z. T. die Patientenliege des Aufnahmeapparates sowie den Holzkörper und eine grüne Messachse für die Bestimmung eines Dichteprofiles. Im Holzkörper erkennt man im Zentrum einen Riss, seine Jahrringstruktur und die Rinde. Es sind ebenfalls drei sehr helle Punkte, die auf eine höhere Dichte zurückzuführen sind, erkennbar. Von einem Punkt verläuft radial ein heller Strang höherer Dichte bis zur Rinde. Die grüne Messachse verläuft quer im unteren Teil des Holzkörpers und trifft die zwei hellen Punkte und den radial verlaufenden Strang höherer Dichte.

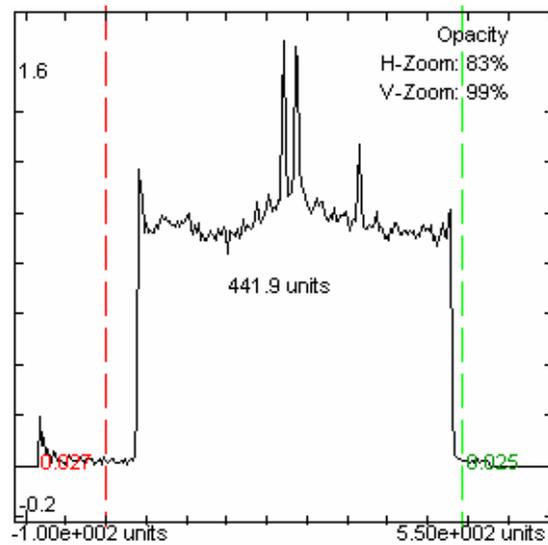


Abbildung 107: BU428_6T, Dichteprofil von Axialschnitt Nr. 38.

Abbildung 107 zeigt das Dichteprofil des Axialschnitts Nr. 38 des Prüfkörpers BU428_6T. Die höheren Peaks in der Kurve spiegeln die Punkte und den gekreuzten Strang mit höherer Dichte wieder. Der erste Peak in der linken Seite der Kurve zeigt die höhere Dichte der Rinde im Vergleich zum Holzkörper.

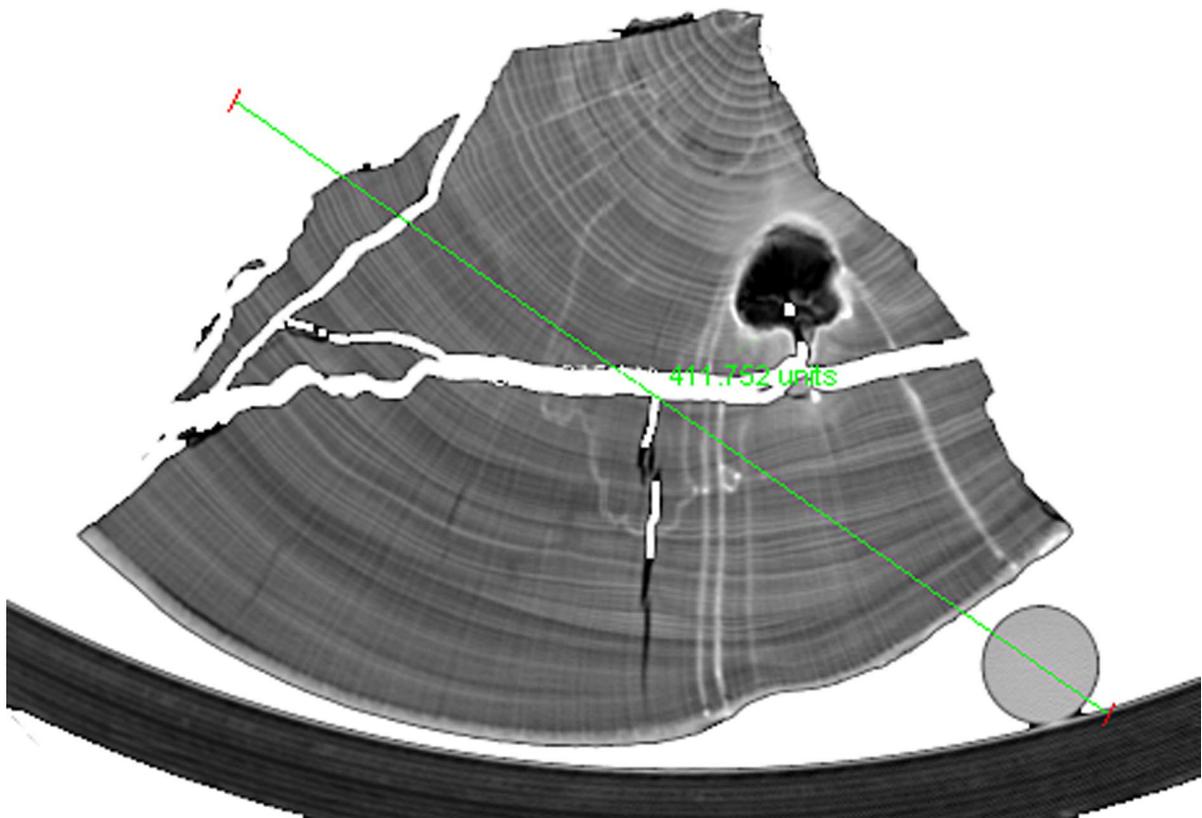


Abbildung 108: BU12_6T, Axialschnitt Nr. 19 mit Messachse für die Dichteprofilbestimmung.

Die Abbildung 108 zeigt den Axialschnitt Nr. 19 des Prüfkörpers BU12_6T. Die Aufnahme zeigt neben dem Holzkörper einen Referenzkörper aus Kunststoff (rechte Seite unterhalb des Holzkörpers) sowie z. T. die Patientenliege des Aufnahmeapparates. Im Holzkörper sind sowohl die Jahrringstruktur, ein Ast, die welligen Ränder des Rotkerns als auch ein Bereich erhöhter Dichte zu erkennen. Um den Ast verläuft ein heller parabelförmiger Strang erhöhter Dichte zur Rinde. Parallel zum linken Ast der Parabel liegt ein weiterer Strang erhöhter Dichte. Die Messachse für die Dichtebestimmung verläuft sowohl durch den Referenzkörper als auch durch den Holzkörper und die Patientenliege des Aufnahmeapparates.

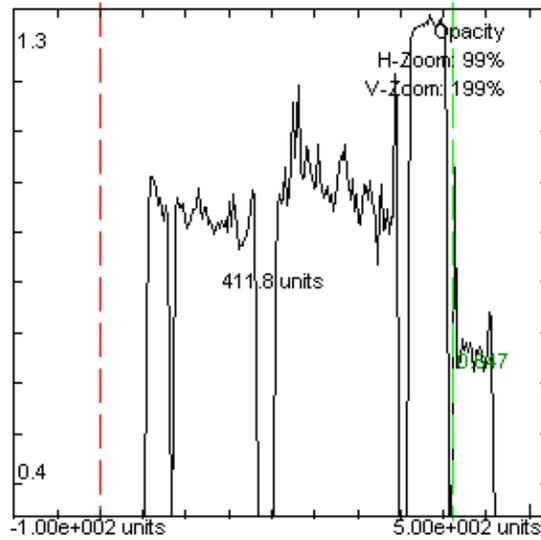


Abbildung 109: BU12_6T, Dichteprofil von Axialschnitt Nr. 19.

Die Abbildung 109 enthält das Dichteprofil des Axialschnittes Nr.19 des Prüfkörpers BU12_6T. Eine höhere Dichte ist im Bereich der Rinde und des Referenzkörpers aus Kunststoff zu sehen. Der Anstieg der Kurve auf ihren höchsten Wert im Holzkörper ist auf den parabelförmigen Strang höherer Dichte zurückzuführen. Die Risse im Holzkörper werden durch die jeweiligen Kurvenabfälle wiedergespiegelt.

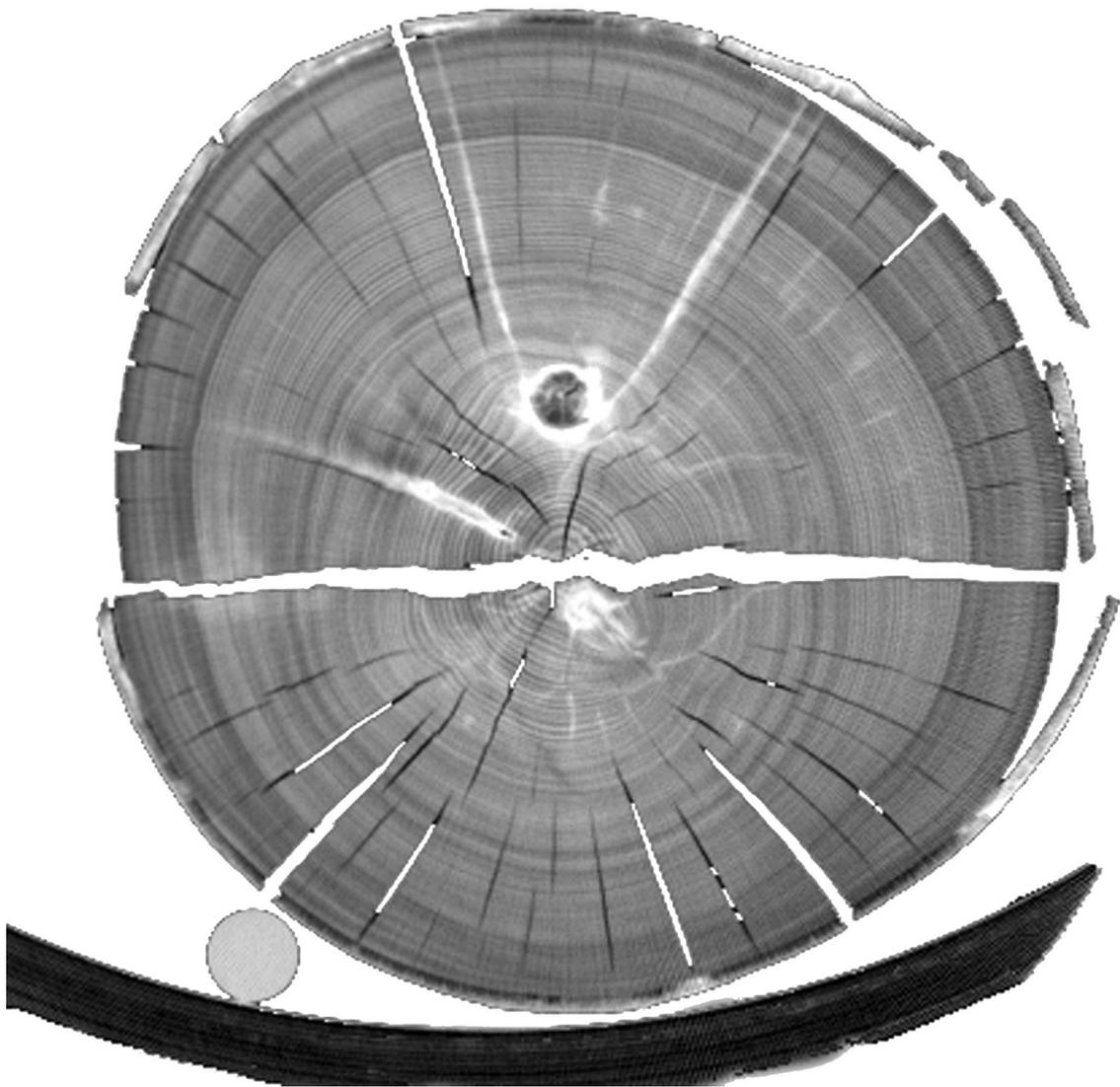


Abbildung 110: BU13_6T, Axialschnitt Nr. 31 mit Dichteerhöhungen; Rotkern; Ast und Parabel.

Die Abbildung 110 zeigt den Axialschnitt Nr. 31 des Prüfkörpers BU13_6T. In der Aufnahme sind neben dem Holzkörper ebenfalls der Referenzkörper aus Kunststoff sowie die Patientenliege des Aufnahmeapparates zu sehen. Die Rinde ist mit erhöhten Dichtebereichen abgebildet. Die Jahrringstruktur ist zu erkennen. Im rechten Bereich neben der Markröhre sind die welligen Grenzen des Rotkernes abgebildet. Der Ast, welcher oberhalb der Markröhre zu erkennen ist, scheint eine niedrigere Dichte in seinem Zentrum zu haben. Von diesem Ast ausgehend erkennt man eine parabelförmige Dichteerhöhung, die sich von der Astaußenseite, die zur Markröhre weist, bis zur Rinde erstreckt.

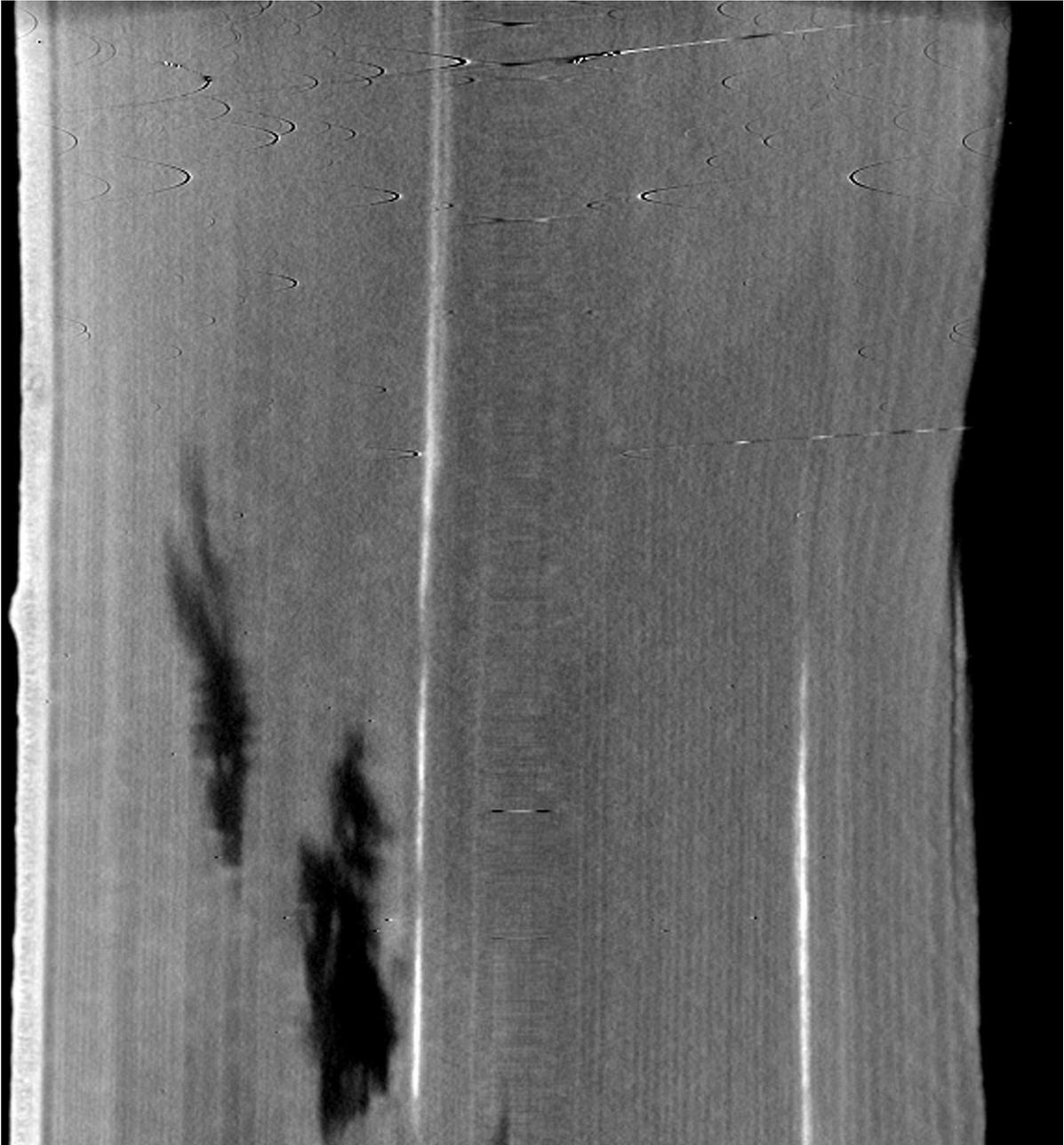


Abbildung 111: BU57_4T, Sagittalschnitt mit Dichteerhöhungen.

Abbildung 111 zeigt einen Sagittalschnitt des Prüfkörpers BU57_4T. Es sind seine Rinde, und z. T. die Jahrringstruktur abgebildet, diese aber größtenteils unscharf. Im Holzkörper sind zwei dunkle Stellen, die von Fäulen verursacht werden, zu erkennen. Zwei, parallel zum Faserverlauf liegende, sehr helle Stränge mit erhöhter Dichte sind deutlich abgebildet.

4.6.5 Das Erkennen von Holzmerkmalen unter Anwendung der Software ‚VGStudio 1.0‘ der Firma Volume Graphics

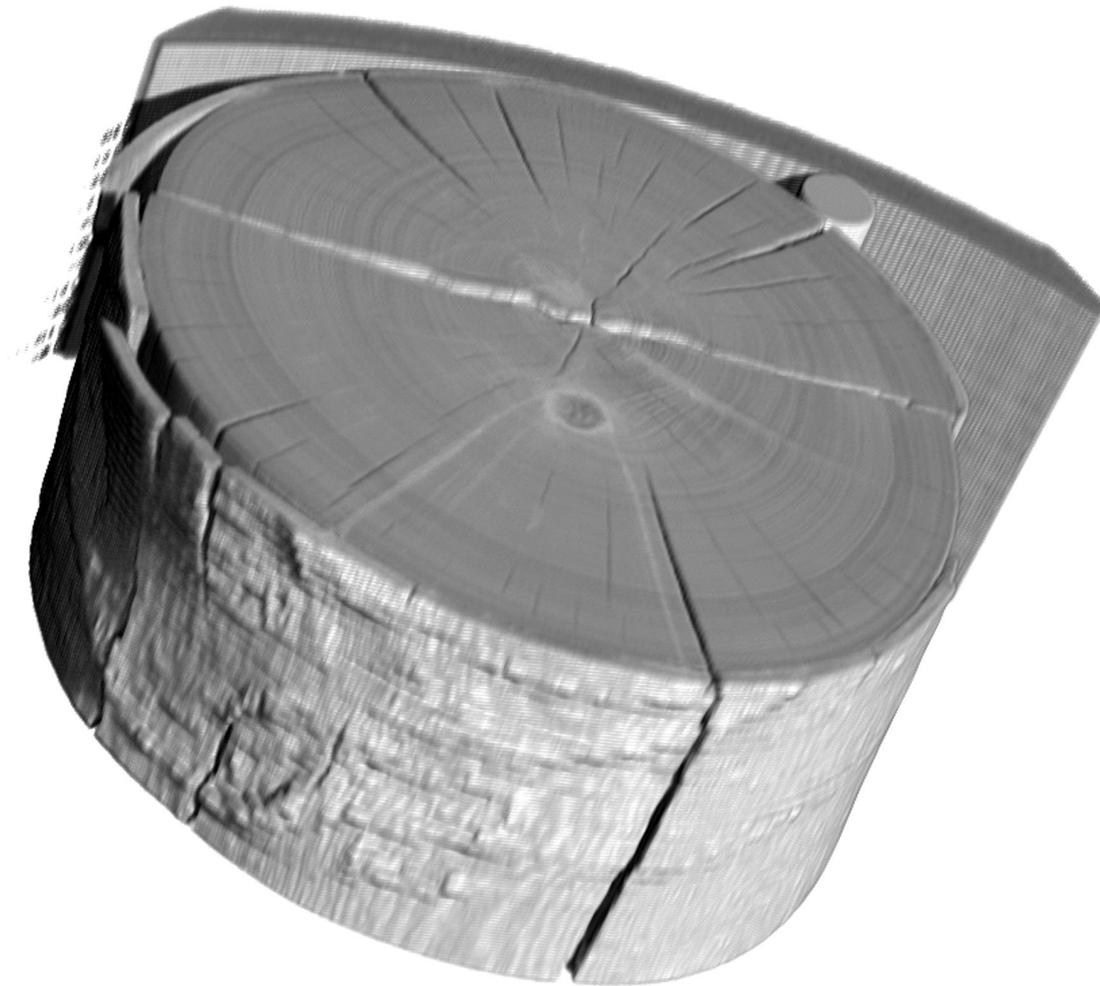


Abbildung 112: BU13_6T, Rundholzabschnitt mit Dichteerhöhung, Ast und Parabel auf der Hirnseite.

In Abbildung 112 ist der Prüfkörper BU13_6T aus allen Scans, die von ihm aufgenommen und zu einem Rundholzabschnitt zusammengesetzt wurden, abgebildet. Die Patientenliege des Aufnahmeapparates und der Referenzkörper aus Kunststoff sind ebenfalls abgebildet. Sehr gut zu erkennen sind die Rinde und Risse. Auf dem Rindenbild ist ein Chinesenbart abgebildet. Auf der Innenseite des Rundholzabschnittes erkennt man einen eingewachsenen Ast und eine von ihm ausgehende parabelförmige Dichteerhöhung, welche sich bis zur Rinde erstreckt. Der Splint ist vom Kernbereich ‚leicht‘ dunkler abgesetzt. Der Trennsplint, der den Prüfkörper

in zwei Hälften unterteilt ist, zu sehen. Zwischen dem Rundholzkörper und der Patientenliege des Aufnahmeapparates liegt der Referenzkörper aus Kunststoff.

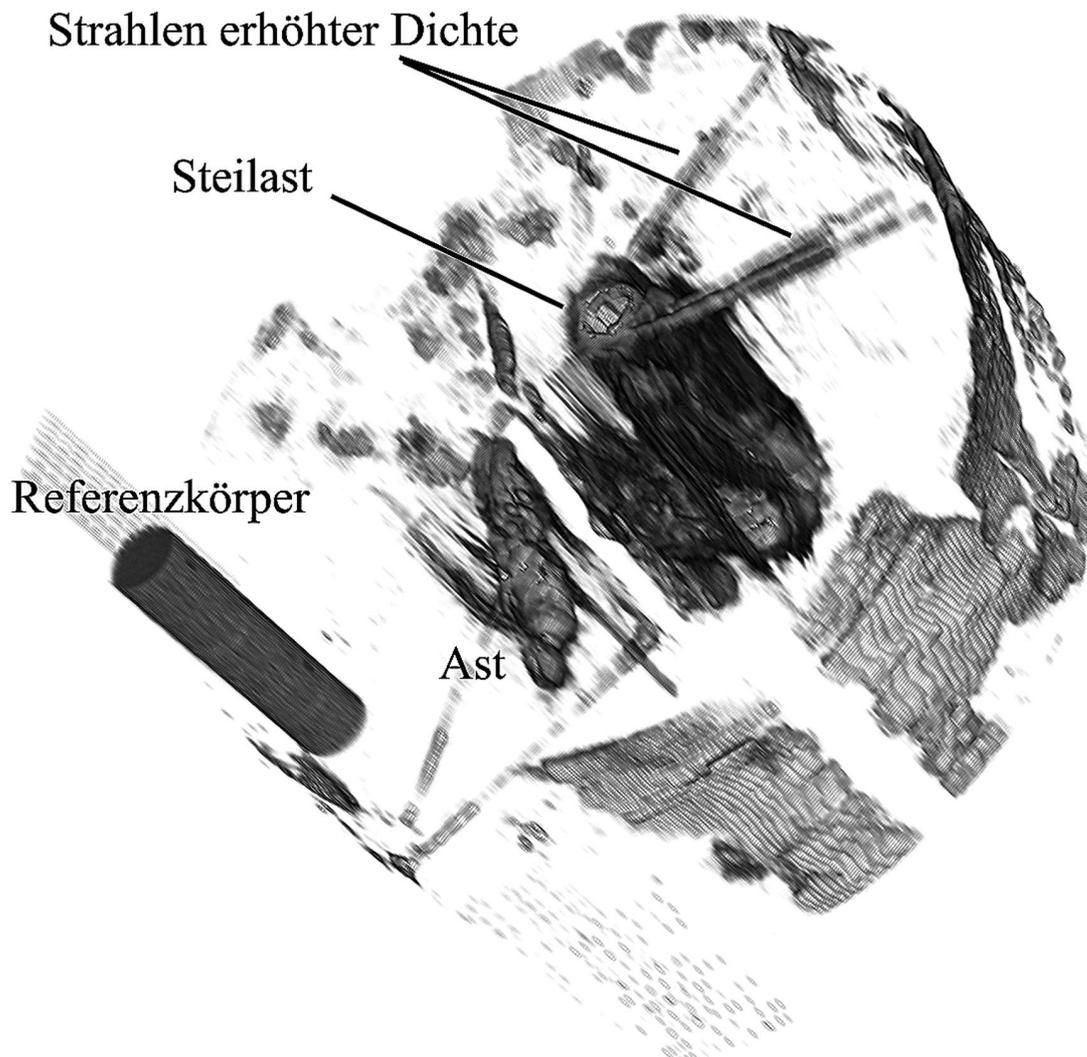


Abbildung 113: BU13_6T, Rundholzabschnitt mit Dichteerhöhung; Ast und Parabel bei Verwendung eines Filters der Software VGStudio 1.0. (Schwellenwert der dargestellten Graustufen = 1000)

Abbildung 113 stellt den Prüfkörper BU13_6T unter Verwendung besonderer Filterfunktionen der Software VGStudio 1.0 dar. Aus dem ursprünglichen Datensatz sind nur die Graustufenwerte, die oberhalb des Schwellenwertes 1000 lagen, dargestellt. Aus diesem Grund ist das Rindenbild nur noch fragmentarisch in ‚Fetzen‘ zu erkennen. Der Referenzkörper bleibt vollständig abgebildet und liegt aufgrund der gedrehten Darstellung der Aufnahme nicht mehr im Hintergrund des Holzkörpers. Die Beschriftung des Bildes zeigt die erkennbaren Merkmale des Prüfkör-

pers. Die parabelförmige Dichteerhöhung, welche von dem Steilast ausgeht, ist deutlich zu erkennen (Strahlen erhöhter Dichte). Neben dem Steilast ist links ein zweiter Ast im Holzkörper abgebildet. Im Zentrum des Steilastes ist eine Zone mit erhöhter Dichte vorhanden. Die Patientenliege des Aufnahmeegerätes ist nur noch hinter dem Referenzkörper (links in der Abbildung) schemenhaft abgebildet, und könnte ohne Wissen ihrer Existenz als solche nicht sicher angesprochen werden.



Abbildung 114: BU166_4T, Prüfkörperdarstellung mit Verwendung eines Filters der Software VGStudio 1.0. (Schwellenwert der dargestellten Graustufen = 600)

Abbildung 114 zeigt den Prüfkörper BU166_4T unter Verwendung besonderer Filterfunktionen der Software VGStudio 1.1. Der Schwellenwert liegt bei 600, d. h. dass aus dem ursprünglichen Datensatz die Werte, die oberhalb des Schwellenwertes liegen dargestellt werden. Um den rechteckigen Prüfkörper ist das Klebe-

band, welches die beiden Hälften zusammenhält zu erkennen. Im Prüfkörper ist der diagonal verlaufende Spalt, welcher die beiden Hälften trennt, sowie seine Risse deutlich zu erkennen. In der oberen Prüfkörperhälfte ist eine Verletzung erkennbar, die heller abgesetzt ist (Hirnseite). Die Jahrringstruktur ist erkennbar. Ihre Struktur ist z. T. lamellenartig, als seien die einzelnen Holzschichten dort durch winzige Hohlräume getrennt. Im Zentrum des Prüfkörpers ist der Rotkernbereich mit seinem welligen Grenzverlauf abgebildet. Der Rotkernbereich ist dunkler gegenüber dem restlichen Holzkörper abgesetzt.

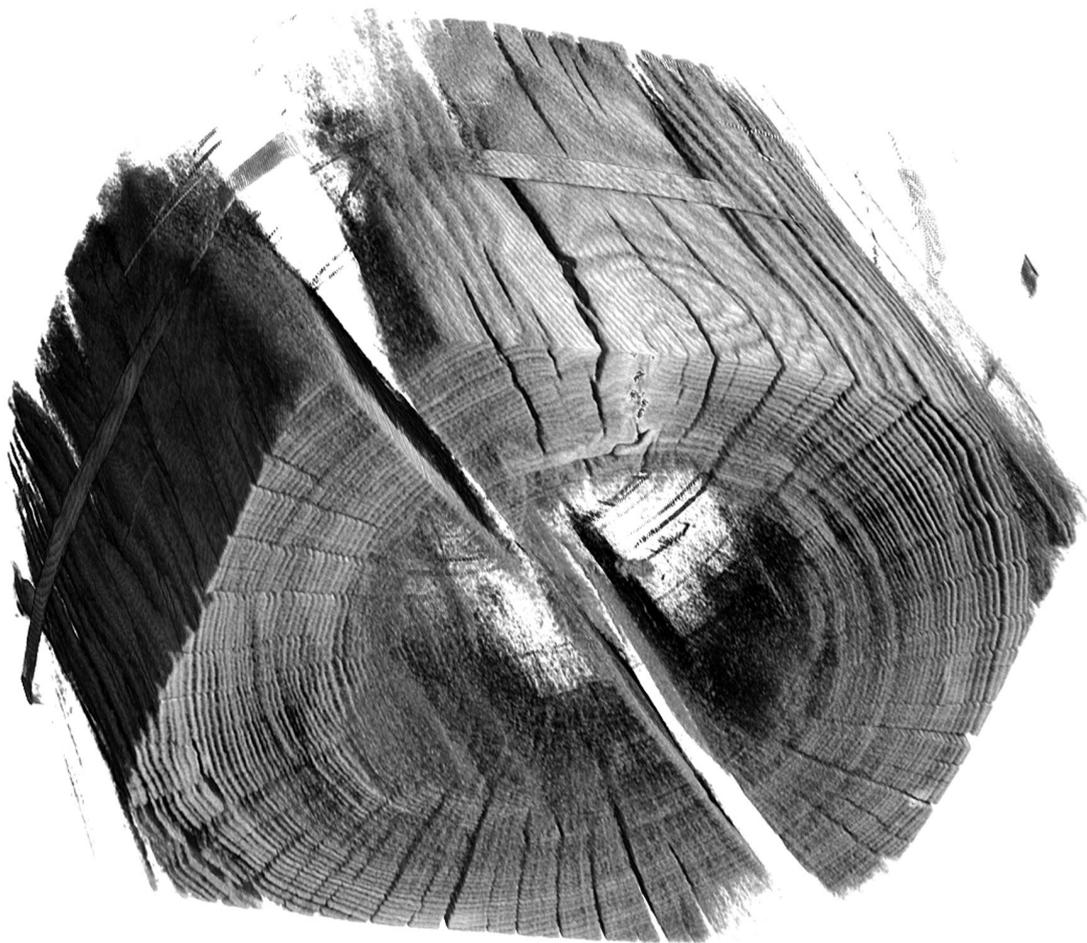


Abbildung 115: BU166_4T: Prüfkörperdarstellung mit Verwendung eines Filters der Software VGStudio 1.0. (Schwellenwert der dargestellten Graustufen = 650)

Abbildung 115 zeigt den Prüfkörper BU166_4T unter Verwendung einer besonderen Filterfunktion der Software VGStudio 1.0 mit dem Schwellenwert 650. Um den

rechteckigen Prüfkörper ist das Klebeband, welches die beiden Hälften zusammenhält, zu erkennen. Im Prüfkörper ist der diagonal verlaufende Spalt, welcher die beiden Hälften trennt, sowie seine Risse deutlich zu erkennen. In der oberen Prüfkörperhälfte ist eine Verletzung erkennbar, die heller abgesetzt ist (Hirnseite). Die Jahrringstruktur ist erkennbar. Ihre Struktur ist lamellenartig, als seien die einzelnen Holzschichten durch winzige Hohlräume getrennt. Im Zentrum des Prüfkörpers ist der Rotkernbereich nicht mehr dargestellt. Es erscheint ein Hohlraum, der nur noch den welligen Grenzverlauf des Rotkerns im Holzkörper widerspiegelt.

4.6.6 Die Verwendung eines Gradientenfilters für die Erkennung von Qualitätsmerkmalen im Rundholzkörper

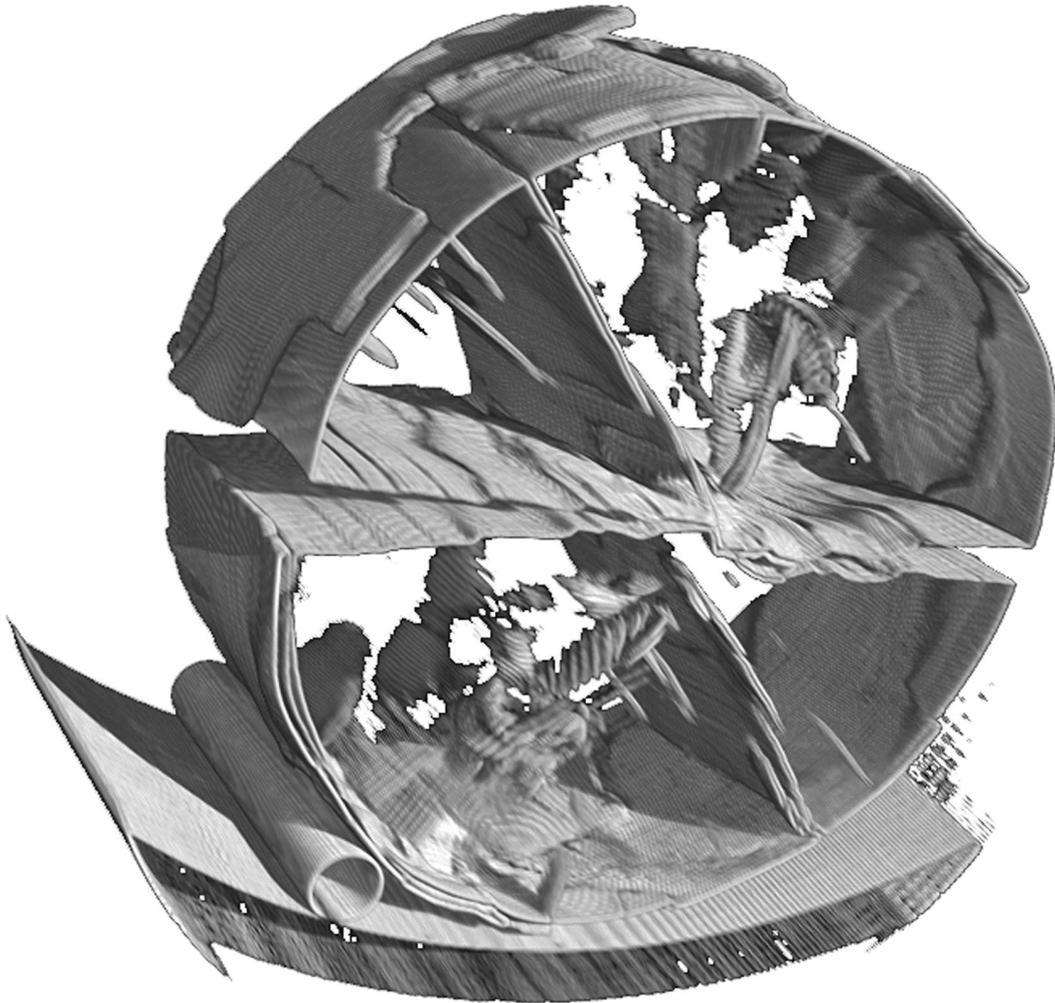


Abbildung 116 BU900_6T: Prüfkörperdarstellung mit Gradientenfilter

Abbildung 116 stellt mit Hilfe des Gradientenfilters der Software VGStudio 1.1 der Prüfkörper BU900_6T dar. In der Abbildung sind unter dem Ergebnis des Filtereinsatzes die Patientenliege des Aufnahmegerätes, der Referenzkörper aus Kunststoff sowie der Holzkörper enthalten. Das Prinzip des Gradientenfilters erkennt man am deutlichsten an dem Referenzkörper aus Kunststoff, der in seinem Inneren homogen, und damit ohne Dichteunterschiede in seiner Masse aufgebaut ist. In der Abbildung zeigt sich der deutlichste Dichteunterschied zwischen dem

Referenzkörper aus Kunststoff und der umgebenden Luft. Seine Masse wird nicht abgebildet, sondern er wird als Hohlkörper dargestellt. Dasselbe Prinzip spiegelt sich bei der Darstellung der Patientenliege des Aufnahmeapparates und bei dem Holzkörper wider. Am deutlichsten sind die im Holzkörper verlaufenden Risse dargestellt, die in der Aufnahme von dünnen Holzschichten ‚eingefasst‘ sind. Die Rinde ist z. T. wegen dem Dichteunterschied zur umgebenden Luft sehr gut dargestellt. Im Holzkörper können allerdings die abgebildeten Bereiche nicht exakt angesprochen werden, ob es sich um Äste oder Besonderheiten, wie Verletzungen (verursachen Lufträume), die Dichteunterschiede ausmachen, handelt.

5 Diskussion

5.1 Innere Astigkeit [Fichte]

Der Grün- sowie der Totast sind wichtige Sortierkenngrößen für Schnittholz. Dabei spielt der Totast vor allem bei der visuellen Sortierung als Ausschlusskriterium eine wichtige Rolle.

Die Entwicklung aller gemessenen Astgrößen (mittlere Astlänge, mittlere Grünastlänge, mittlere Totastlänge und maximaler Astdurchmesser) zeigt über die drei untersuchten Baumhöhen keinen eindeutigen Trend bezüglich einer Zu- oder Abnahme vom Stammfuß zur Krone. Nur bei den zwei Versuchsflächen (Freising 813 und Höglwald 7) nehmen die maximalen Astdurchmesser von der Stammbasis zur Krone zu. GLOS ET AL. (2003) stellen bei Fichtenstarkholz eine Zunahme des mittleren Astdurchmessers mit der Zunahme der Stammhöhe fest. Außer bei den Fichten auf den genannten Versuchsflächen Freising 813 und Höglwald ist in dieser Arbeit auf allen anderen untersuchten Versuchsflächen diese Ausprägung nicht vorhanden. GRAMMEL (1990) beschreibt diese Ausprägung ebenfalls. Seinen Ergebnissen nach verändert sich die Aststärke kaum baumhöhenabhängig. Dieses Ergebnis ist vor allem auf die Verwendung von höheren Stammabschnitten für die Schnittholzproduktion von Bedeutung, da hier sehr wohl deutlich größere Äste auftreten können, als in unteren Stammabschnitten. Dabei ist in dieser Arbeit zu berücksichtigen, dass keine Proben aus dem direkten Kronenbereich untersucht worden sind.

Im Gegensatz zur Totastlänge wird die Länge des mit dem Holzkörper fest verwachsenen Grünastes deutlicher vom maximalen Astdurchmesser beeinflusst. Die Ausdifferenzierung während der Bestandesdauer und die Ausgangsdichten bei der Bestandesbegründung scheinen hier eine größere Rolle zu spielen. Diese Annahme widersprechen KRAMER ET AL (1971), welche bei ihrer Untersuchung von Pflanzverbänden beobachteten, dass abgesehen von Extremverbänden, keine klare Abhängigkeit der Aststärke von der Dichte der Reihenverbände besteht.

Vergleicht man die Ergebnissen der untersuchten Versuchsflächen, so unterscheiden sich die Aststärken deutlich. Der Standort und die Herkunft der Bäume auf den Versuchsflächen können hier einen starken Einfluss auf die Astentwicklung haben. Diese Annahme wird von den Ergebnissen der Untersuchungen von

MRÁČEC in der Tschechoslowakei bekräftigt. In seiner Arbeit haben offenbar Standort und Provenienz einen größeren Einfluss auf die Ästigkeit eines Bestandes als sein Ausgangsverband. Der in jungen Beständen bemerkbare, vielfach von Standort und Provenienz überdeckte Einfluss des Ausgangsverbandes auf die Anzahl der Qualitätsbäume eines Fichtenbestandes wird also offenbar durch die späteren Pflegehebe weitgehend beseitigt“ (zit. nach KRAMER ET AL, 1971).

5.2 Reaktionsholz [Fichte]

Reaktionsholz wurde aus zeitlichen Gründen nur an den Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 untersucht. Dort kommt es am häufigsten in Südrichtung und in den Stammhöhen 1,3 [m] bis 8,3 [m] vor. Dieses Ergebnis wird durch die Arbeit von WERNSDÖRFER (2001) bekräftigt. In seiner Untersuchung liegt der höchste Reaktionsholzanteil mit der breitesten Streuung in den Mittelwerten ebenfalls in den mittleren Stammabschnitten, allerdings mit den höchsten Mittelwerten in Nord-Osten. Beide Ergebnisse belegen die zonale Bildung von Reaktionsholz im Stammquerschnitt, wie sie auch BOSSHARD (1984) beschreibt. In den Ergebnissen von BUES (1990) lag der Großteil des Druckholzes bei 75% der untersuchten Stammscheiben in einem Bereich zwischen Nordost (45°) bis Südost (135°). Dieses Ergebnis ‚untermauert‘ ebenfalls die Annahme, dass eine vermehrte Reaktionsholzbildung in Abhängigkeit einer Himmelsrichtung und oder Lage im Stamm gebildet wird.

Ein Zusammenhang zwischen der Bildung von Reaktionsholz und der Baumhöhe kann für die Zwieseler Fichten angenommen werden, da das höchste Vorkommen in den Stammhöhen 1,3 [m] bis 8,3 [m] liegt. In jungen Jahren des Baumes findet in dem späteren unteren bis mittleren Stammstück die höchste mechanische Beanspruchung statt. Nach Abschluss des Höhenwachstums und dem Einsetzen des sekundären Dickenwachstums der Bäume tritt die mechanische Beanspruchung am häufigsten in Kronennähe und im Kronenbereich selbst auf, wenn z. B. eine einseitige Kronenausformung oder Windeinwirkung vorliegt. Erstgenanntes war bei den Fichten der Zwieseler Versuchsflächen nicht vorhanden. Sie hatten alle keine einseitige Krone ausgebildet.

Der gesicherte Einfluss der Baumhöhe auf die Bildung von Reaktionsholz konnte in den Untersuchungen von BUES (1990), ABETZ U. KÜNSTLE (1982) nicht nachge-

wiesen werden. Dagegen entdeckt WERNSDÖRFER (2001), dass „der durchschnittliche Reaktionsholzflächenanteil im oberen Stammabschnitt signifikant größer ist (im Verhältnis zur Stammscheibenquerfläche und Alter) als im mittleren oder unteren Abschnitt.“ SEELING (2001) stellte ebenfalls fest, dass an Kanthölzern der Reaktionsholzanteil im unteren Stammabschnitt am geringsten sei.

Andere in der Literatur belegte Einflussgrößen auf die Bildung von Reaktionsholz sind u. a. einseitige Windeinwirkung, starke Hangneigung und Schneedruck oder Bodenverschiebungen (WAGENFÜHR u. SCHEIBER, 1985). Die Versuchsflächen in Zwiesel weisen sowohl eine starke Hangneigung als auch starken Schneedruck auf. Die Ergebnisse zeigen, dass die Fichten auf Hangabgewandter Seite (Südseite) vermehrt Reaktionsholz gebildet wurde.

5.3 Rohdichtemessung

5.3.1 Rohdichte und Jahrringbreite (radiale Rohdichtemessung)

Fichte

Die Ergebnisse der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Jahrringbreite und der Rohdichte in dieser Arbeit wurde ausschließlich an Fichten der Zwieseler Versuchsflächen untersucht. Die Anzahl der Jahrringe pro Prüfkörper wurde mittels eines EDV-Programms aus den radialen Jahrringmessungen bestimmt. Da stets 4 [cm] große Prüfkörper ausgeformt wurden, kann gelten, dass die durchschnittliche Jahrringbreite mit zunehmender Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper abnimmt.

Der niedrige Determinationskoeffizient bei der Auswertung aller zugrunde liegenden Fichten der Versuchsflächen in Zwiesel zeigt einen begrenzten Einfluss der Jahrringbreite auf die Rohdichte. GLOS ET AL. (2003) haben sogar deutlich schwächere Zusammenhänge zwischen Jahrringbreite und Rohdichte an Fichtenstarkholz festgestellt.

Das Ergebnis der Auswertung der Rohdichtemessung an den Zwieseler Fichten zeigt, dass es nicht möglich ist, verallgemeinert einer durchschnittlichen Jahrringbreite einen Rohdichtewert zuzuordnen. Die Aussagen von TRENDELENBURG UND MAYER-WEGELIN (1955), BERNHART (1964), OLESEN (1976), SEELING (2001), dass die Rohdichte negativ mit der Jahrringbreite korreliert, können hier nicht bestätigt

werden. Die Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 135 zeigen in ihrer Osthimmelsrichtung die niedrigste Anzahl von Jahrringen im Prüfkörper. Daraus abgeleitet sind dort durchschnittlich breitere Jahrringe. Diese haben allerdings eine höhere Rohdichte als die anderen Himmelsrichtung.

Im Widerspruch zu diesen Ergebnissen stellte KENNEL (1965) einen engen Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Jahrringbreite bei Fichten der Versuchsflächen Zwiesel und Denklingen fest. Seine Ergebnisse stimmen allerdings mit den der tangentialen Rohdichtemessung überein. Er stellte auch keine systematischen Raumdichteunterschiede zwischen Rein- und Mischbeständen fest.

Weitere Autoren sehen anders als GRAMMEL (1990) Schwierigkeiten die Beziehung zwischen Jahrringbreite und Rohdichte als klare Gesetzmäßigkeit festzulegen. LEINERT (1962) berichtet, dass „die Beziehung Jahrringbreite / Rohdichte nach den Ergebnissen beider Untersuchungsgänge [...] keine befriedigende Erklärung für die Rohdichtebildung abzugeben vermag. Somit findet sich [...] bestätigt, wonach die Jahrringbreite bestenfalls als ungefähre Weiser für die Rohdichte – allerdings mit betonter Einschränkung – benutzt werden kann.“

BURGER (1953) erkannte beim Zusammenhang zwischen Rohdichte und Jahrringbreite einen Einfluss der Meereshöhe. Dieser Zusammenhang ist hier nicht erkennbar.

In den Ergebnis der ansteigenden Jahrringanzahl pro Prüfkörper bei zunehmender Baumhöhe wird die gültigen Aussagen, dass der größte Zuwachs im unteren Stammabschnitt erfolgt unterstützt.

5.3.2 Radiale Messung der mittleren Rohdichte [Fichte]

Die radiale Rohdichtemessungen sind ausschließlich an Fichten der Versuchsflächen Zwiesel 134 und 135 durchgeführt worden. Die Versuchsflächen unterscheiden sich nur im Alter und im Mischungsgrad.

Die Rohdichtewerte auf den zwei Versuchsflächen zeigen deutliche Unterschiede, trotz des gleichen Standortes. Es muss berücksichtigt werden, dass auf der Versuchsfläche Zwiesel 135 nur vier Bäume untersucht wurden, von denen drei aus einer Parzelle (Behandlungsart) stammten.

Die Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 134 haben im Gegensatz zu den Fichten der Versuchsfläche Zwiesel 135 einen deutlich höheren Rohdichtemittelwert. Beide Versuchsflächen zeigen keinen eindeutigen Trend der Rohdichte über der Baumhöhe. Sie nimmt von der Stammbasis zur Krone weder eindeutig ab noch zu. Innerhalb der untersuchten Baumhöhen zeigen sich sehr feine Unterschiede in den vier Haupthimmelsrichtungen. Bezieht man dieses Ergebnis auf die Verwendung des Stammholzes in der Praxis, so bedeuten diese feinen Unterschiede keine Einschränkungen.

5.3.3 Tangentiale Messung der mittleren Rohdichte

Fichte

Die Ergebnisse der radialen und tangentialen Messungen zeigen identische Werte für die Fichten der Versuchsflächen in Zwiesel.

Zusätzlich wurde die Rohdichte in der Biegeprüfung auf allen Versuchsflächen bestimmt.

Die Mittelwerte der Versuchsflächen DEN 05, ZWI 135 und SON 814 zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf in ihren Ergebnissen.

Bei Betrachtung aller Fichten (2120 Prüfkörper) zeigt sich in allen drei untersuchten Baumhöhen ein deutlich ausgeprägter höherer Rohdichtemittelwert in der Osthimmelsrichtung. Dieser Wert kann nicht ausschließlich auf den Standort oder die Behandlungsart einer Parzelle zurückgeführt werden. Zwischen den drei untersuchten Baumhöhen besteht praktisch kein Unterschied in den Rohdichtemittelwerten. Diese Ergebnisse entsprechen denen von STERN (1961). Er fand signifikante Unterschiede zwischen den Mittelkurven verschiedener Bestände. Allerdings konnte er nur einen schwachen Einfluss der Himmelsrichtung feststellen, der ebenfalls ohne Bedeutung für die Verwendung des Rohstoffs ist.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch LEINERT (1962). Bei seinen Untersuchungen ist die Abweichung der Einzelwerte vom Mittel innerhalb der Bestände zufallsmäßig verteilt, wobei die Unterschiede zwischen den einzelnen Beständen signifikant sind. Er untersuchte vor allem Bestände aus unterschiedlichen Meereshöhen.

Keinen Einfluss des Standortes auf die Rohdichte sah auch GÖHRE (1958): „[...] Rohdichteschwankungen zwischen den Einzelstämmen innerhalb eines Standortes [überdecken] die Rohdichteunterschiede zwischen den zwei Standorten im großen und ganzen. Damit wird auch die Feststellung TRENDELENBURGS bestätigt, dass sowohl der gute als auch der schlechte Standort Fichtenholz derselben Güte erzeugen kann“. Diese Aussage gilt seiner Meinung nach auch für Wuchsgebiete. BUES (1990) fand nur unwesentliche Unterschiede in der Rohdichte zwischen Erdstammstücken und schaftaufwärts anschließenden Stammteilen.

Buche

Die Rohdichte nimmt von der Stammbasis zur Krone ab. Dieses Ergebnis stimmt mit den Angaben von SCHWAPPACH (1894), GRÖBLER (1943); GÖHRE UND GÖTZE (1956), LEWARK (1987) und BUES U. SCHULZ (1989) überein. SCHLEICHER (1935), BURGER (1940), und SACHSSE (1973) bestätigen dies ebenfalls und geben eine Abnahme des spezifischen Holzgewichtes bis in eine Höhe von 12-20 [m] im Baum an, bevor die Rohdichte in noch höher gelegenen Stammteilen der Buche wieder etwas ansteigt.

In allen drei untersuchten Baumhöhen und auf allen Versuchsflächen hat die Rohdichte ihren deutlich höchsten Wert im Westen. Zwar hat SACHSSE (1973) auch einen Einfluss der Himmelsrichtung z. B. auf Astholz bei Buche festgestellt, jedoch widersprechen seine Ergebnisse den Untersuchungen von HARTIG (1888), GÖHRE UND GÖTZE (1956), KLOTZENBURG (1966) sowie GRAMMEL ET AL. (1989), die keine gesicherten Unterschiede gefunden haben.

GÖHRE UND GÖTZE (1956) bestätigen, dass „eine mathematisch-statistisch gesicherte Rohdichteabnahme zwischen Mark und Rinde bei der Rotbuche nur im unteren Stammteil vorliegt, wie es sich in den Ergebnissen dieser Untersuchung widerspiegelt. [...] Eine Beziehung zwischen Jahrringbreite und Rohdichte besteht nicht. Ein mathematisch-statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen Holzmasse, Formzahl, Durchmesser, [Himmelsrichtung], Höhe auf der einen Seite und der Rohdichte auf der anderen Seite konnte nicht festgestellt werden.“ GÖHRE (1958) bestätigt noch einmal, dass „die Rohdichte des Rotbuchenholzes [...] im wesentlichen ohne statistisch gesicherte Unterschiede im Querschnitt wie in der Höhe des Baumes verteilt ist. Eine enge Beziehung zwischen Alter und Rohdichte

bzw. Jahrringbreite und Rohdichte besteht [ebenfalls] nicht. Die Rohdichte wird in der Hauptsache vom Anteil der Gefäße im Jahrring beeinflusst.“

Zwischen den einzelnen Versuchsflächen bestehen deutliche Unterschiede in den Rohdichtewerten. Das kann auf den Standort und die Herkunft der Bäume zurückgeführt werden. Der Einfluss des Standortes ist in der Literatur von KOLTZENBURG (1966), KELLER ET AL. (1976) sowie KOLTZENBURG UND KNIGGE (1987) angegeben. Die Rohdichtestreuung innerhalb von Beständen ist z. T. allerdings größer als die zwischen den Mittelwerten der Bestände aus verschiedenen Wuchsgebieten, was den Ergebnissen von GIEFING UND LEWARK (1990) entspricht. Die beiden Autoren POPPER UND EBERLE (1992) erkannten lediglich einen Einfluss der Baumherkunft auf die Rohdichte.

Einen geringen Einfluss des Standortes bezüglich der Rohdichte bei der Buche fanden FRÜHWALD ET AL. (1988), allerdings mit Unterschieden bei Ausschaltung der Rohdichte in der Auswertung der elastomechanischen Untersuchungen (s. u.).

5.4 Biegefestigkeit [N/mm²] und E-Modul [N/mm²] [beide Baumarten]

Fichte

In den Ergebnissen der Biegefestigkeit zeigen die Versuchsflächen SON 814 und ZWI 135 einen ähnlichen Kurvenverlauf und die Biegefestigkeitswerte liegen hier sehr eng beieinander. Einen ähnlichen Trend in ihren Kurven aber abweichend von den erstgenannten, zeigen die DEN 05- und Höglwald 7– Fichten, wobei hier die Werte insgesamt weiter auseinander liegen. Bei den letztgenannten beiden Versuchsflächen ist der Anteil der Varianz an der Streuung der Biegefestigkeitswerte am geringsten von der Rohdichte beeinflusst.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der sechs Versuchsflächen in den drei untersuchten Baumhöhen zeigt sich, dass in Ostrichtung zwar die höchste Rohdichte liegt, die höchste Biegefestigkeit sich aber genau gegenüber im Stammquerschnitt auf der Westseite befindet. Dieses Ergebnis spiegelt den Einfluss der Rohdichte auf die Biegefestigkeit wider. Allerdings müssen noch andere Faktoren berücksichtigt werden.

Der Einfluss der Rohdichte auf den Biege-E-Modul ist bei den Versuchsflächen ZWI 134 / 135 und SON 814 etwas schwächer als auf die Biegefestigkeit. Insgesamt ist der Einfluss der Rohdichte in dieser Arbeit schwächer ausgeprägt, als

z. B. bei SEELING (2001), die eine starke Abhängigkeit der Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit an Werkstoffproben von der Darrdichte nachgewiesen hat. Diese Beziehung wird z. T. als linear angegeben (GABER, 1937; KOLLMANN, 1968; MARCHAND, 1982; GRAMMEL ET AL., 1988; SEELING, 2001). Die Ergebnisse der Untersuchungen zu der elastischen Verformbarkeit des Holzes zeigen, dass in dieser Arbeit die elastische Verformbarkeit zusätzlich von anderen Faktoren beeinflusst sein muss.

Als Einflussgrößen auf die Biegefestigkeit können verschiedene Merkmalsausprägungen eine Rolle spielen, z. B. entdeckt SEELING (1999) einen Einfluss von Druckholz auf die Biegefestigkeit, der eine Abnahme von bis zu 24,4% bei vorherrschenden Fichten verursacht.

Buche

Die physikalischen Kenngrößen, Biegefestigkeit und Biege-E-Modul, nehmen innerhalb des Stammes von der Basis zur Krone ab. Alle Buchen haben ihren höchsten Mittelwert eindeutig im Westen. Der Einfluss der Rohdichte auf die elasto-mechanischen Eigenschaften ist insgesamt schwach ausgeprägt. Die Ergebnisse zeigen vor allem einen tendenziellen schwächeren Einfluss der Rohdichte auf die Biegefestigkeit als auf den Biege-E-Modul. GLOS U. LEDERER (2000) stellten dieses an Schnittholz ebenfalls fest. In ihren Ergebnissen, sowie in denen von v. MALDEGHEM (2001), die Zugfestigkeitsprüfungen an Buche durchführte, ist der Einfluss der Rohdichte auf die Festigkeitseigenschaft der Buche sogar deutlich schwächer ausgeprägt als bei den Buchen in der vorliegenden Arbeit.

Vergleich der beiden Baumarten

Die zwei untersuchten Baumarten unterscheiden sich deutlich in ihren Ergebnissen der Biegeprüfung. Der Einfluss der Rohdichte auf die beiden anderen untersuchten physikalischen Kenngrößen ist bei der Buche deutlich schwächer ausgeprägt als bei der Fichte.

Die Rohdichte zeigt bei der Buche einen höheren Einfluss auf den E-Modul, aber einen deutlich schwächeren auf die Biegefestigkeit. Bei der Fichte ist der Einfluss der Rohdichte auf die Biegefestigkeit und den Biege-E-Modul etwa gleich ausgeprägt.

Daraus lässt sich für die Fichte ableiten, dass „die Beziehungen zwischen Rohdichte und Festigkeit sich in der Regel durch positive lineare Korrelationen ausdrücken lassen. Sie sind in dieser Form vielfach belegt“ (BERNHART, 1964).

Dementgegen stellt GRAMMEL (1989) aber fest, dass selbst „die Rundholzeigenschaften auch nur einer Holzart [...] zwischen den Bäumen und innerhalb eines Baumes in allen denkbaren Dimensionen in großem Umfang [variieren]“.

Für Fichten aus dem Bayerischen Wald hat BERNHART (1964) festgestellt, dass bei durchschnittlicher Rohdichte, die Biegefestigkeit und der E-Modul über den arithmetischen Mitteln, die in der Literatur angegeben sind, liegen. Seine Ergebnisse können durch die Ergebnisse der Zwieseler Versuchsflächen in dieser Arbeit nur z. T. bestätigt werden.

5.5 Computertomographie

5.5.1 Innere Astigkeit

Bei Buche gelingt die Erfassung von Ästen, die im Rundholzkörper eingewachsen sind, durch ihre höhere Dichte mit Hilfe der computertomographischen 3D-Darstellung sehr gut. Dies wird vor allem in den Aufnahmen des Kegelstrahltomographen deutlich, bei dem der gesamte Prüfkörper gescannt wurde. In den Aufnahmen des Somatom Gerätes von Siemens muss berücksichtigt werden, dass die Aufnahmen sowohl in 3 [mm] als auch in 5 [mm] Abständen durchgeführt wurden. Dadurch kommt es zu Verzerrungen in den Darstellungen. Der physiologi-

sche Zustand des Astes im Holzkörper kann in den Aufnahmen sehr gut diagnostiziert werden. Der Grünast zeigt in etwa dieselben Absorptionswerte wie das ihn umgebende Holzgewebe. SACHSSE (1973) fand in seinen Untersuchungen heraus, dass Äste eine bis zu 3,8 % höhere Darrdichte als Schaftholz haben. In den CT-Aufnahmen wurden keine darrtrockenen Probekörper verwendet.

Totäste sind i. d. R. von einem Ring erhöhter Dichte umgeben. Wie NÄHER (2002) zeigt, ist die Vermessung des Astes im Holzkörper anhand von Sagittalschnitten sehr gut durchführbar (vgl. Abb. 102). Hier zeigt sich, dass der Grünast 0,3 [cm] oberhalb des Hirnschnittes vom Stammzentrum aus betrachtet, beginnt. Er hat eine Gesamtlänge von 9,1 [cm] und schließt mit der Markröhre einen Winkel von 30° ein. Die Länge des Totastes beträgt 2,0 [cm] und der eingeschlossene Winkel beträgt 38°. Die Gesamtbreite der Probe misst vom Astansatz 16 [cm] und der astfreie Mantel des Rundholzkörpers beträgt 9,4 [cm]. Die im Rindenbild gemessene Barthöhe von 10 [cm] wird von den 10,2 [cm] in der CT-Aufnahme gemessenen, sehr gut widerspiegelt. Dieses Ergebnis bestätigt nicht, dass mit zunehmenden Alter die Enden der Chinesenbärte nach oben auswandern und dadurch die Barthöhe abnimmt, wie bisher angenommen wurde.

Auf den Aufnahmen der CT erkennt man, dass die Astnarbe über der Abbruchstelle liegt. Dieser Versatz beträgt am oberen Ende 0,5 [cm], wenn von der Oberkante des Siegels ausgehend gemessen wird. An der Unterkante des Siegels tritt dieses noch deutlicher in Erscheinung. „Das spricht dafür, dass die Merkmale für die Ausprägung des Rindenbildes [...] bei ‚Steilästen‘ [...] in Längsrichtung mitgeführt werden (NÄHER, 2002).“ Da das Mark des Astes nicht mit der Markröhre [des Holzkörpers] auf einer zum Sagittalschnitt parallelen Ebene liegt, ist der Ast nicht auf seiner ganzen Länge in der Mitte getroffen. Er liegt etwas versetzt in der Abbildung. Aus diesem Grunde ist die gemessene Siegelhöhe von 4,0 [cm] niedriger, als die am Rindenbild gemessene Höhe von 5 [cm]. Diese Höhe wird erst in räumlich nachgeordneten Schichten erreicht. Die Darstellung von Ästen im Frontalschnitt (x-z Ebene) zeigt einen zur Längsachse des Probekörpers parallelen Querschnitt durch den Ast. NÄHER (2002) berechnete die Fläche des Astes unter Verwendung des Softwareprogramms Scion Image 3b. Bei seinem Ergebnis beträgt die Astfläche 4,7 [cm²]. Die Astflächenberechnung kann somit ohne Zerstörung des Rundholzkörpers durch vorher festgelegte ‚Schnittebenen‘ erfolgen. Eine Prognose der zu erwartenden Schnittholzqualität in Bezug auf seine Optik und die

potentielle Einstufung nach Festigkeitssortierungen (DIN oder EN) ist möglich, wenn das gewonnene Datenmaterial diesbezüglich weiterverarbeitet wird.

5.5.2 Parabel mit erhöhter Dichte bei Ästen

In den Bildern der Axialschnitte (z. B. Abb. 114) zeigt sich, dass deutliche Dichteerhöhungen als Parabelform erscheinen, die auf ‚Störungen‘ im Holzkörper zurückzuführen sind. Der Scheitel der Parabel umschließt den eingewachsenen Ast und liegt auf der zum Mark des Rundholzkörpers gerichteten Seite. Die Schenkel enden im Rindenbild im Chinesenbart.

Es zeigen sich auch geringe Dichteerhöhungen in den Rundholzkörpern, die ebenfalls eine parabelförmige Form besitzen. Diese Unregelmäßigkeiten in der Struktur des Holzkörpers sind aufgrund des geringen Kontrastes nur bei einem visuellen ‚Durchlaufen‘ durch den Prüfkörper entlang der z-Achse am Bildschirm sichtbar (siehe NÄHER 2002, Abb. 28, S.31). Der Effekt, dass das menschliche Auge spezialisiert ist, bewegte Details leichter wahrzunehmen, wird schon von KALENDER (2000) betont.

5.5.3 Zusammenhang Rindenbild und Astigkeit

Details des Rindenbildes sind in den Axialschnitten und in den Sagittalschnitten sehr gut zu erkennen. Für die Bestimmung und Erfassung der Verhältnisse zwischen dem im Holzkörper liegenden Ast und dem zugehörigen Chinesenbart ist dieses von großer Bedeutung. Nach SCHULZ (1961) kann die innere Astgröße nach Vermessen des Chinesenbartes relativ genau berechnet werden.

In der CT-Aufnahme sind der Bart, die zentrale Narbe des Siegels und dessen Ränder sehr gut bestimmbar. Wenn von der Markröhre des Rundholzkörpers ausgehend Linien über die Ränder des Astes gezogen werden, zeigt sich, dass der Bereich den diese Linien als Grenze im Rindenbild markieren kleiner ist, als der Bereich zwischen den Rändern des Siegels und der Markröhre. Das Verhältnis zwischen Ast und Siegelbreite ist nicht direkt proportional. Das Verhältnis wird um einen Faktor verändert, der nicht allein auf das Dickenwachstum des Baumes zurückzuführen ist. Die Parabel mit erhöhter Dichte (s. o.) kann die Diskrepanz zwischen der Ast- und der Siegelbreite erklären, weil die Schenkel nicht direkt zum Mark weisen, sondern einen weiteren Öffnungswinkel besitzen.

Die Vermutung liegt nahe, dass eine Induzierung von Wundgewebe während des Absterbeprozesses des Astes im Übergang zum lebenden Holz stattgefunden hat. Dadurch wurde ein Ring von Holzgewebe mit stark erhöhter Rohdichte gebildet. Die Ausläufer erstrecken sich wie die Schenkel einer Parabel bis zur Rinde. Dieses Phänomen ist aber lokal beschränkt. In Längsrichtung (z-Achse) ist die Parabel räumlich sehr stark eingeschränkt, da sie in den vor- und nachfolgenden Aufnahmen nicht mehr vorhanden ist.

5.5.4 Mondkrater

Die Aufnahmen des Prüfkörpers BU57_4T mit dem Kegelstrahltomographen werden für die exemplarische Untersuchung des Mondkraters verwendet.

Die im Rundholzkörper liegende Verletzung wird von einer Zone gesunden Holzes mit stark erhöhter Dichte umgeben. An die Verletzung schließt in radialer Richtung ein Bereich verminderter Dichte an, der vom Rand aus mit Kallusgewebe überwallt worden ist. Noch Jahre nach der Verletzung bleibt die Kontaktstelle der Überwallungswülste des Kallusgewebes als dunkler Strich (verminderte Dichte) erhalten. SCHUMANN UND DIMITRI (1993) beschreiben als Abwehrreaktion der Buche eine bis zu mehreren [mm] starke, dunkel gefärbte sog. Schutzholzzone. Angrenzend an diesen optisch deutlich erkennbaren Bereich zeigt das dort unverfärbt erscheinende Holz in einer Zone von wenigen [mm] bei mikroskopischer Betrachtung ebenfalls Reaktionen durch Verschließen der Gefäße und Mobilisierung von Reservestoffen. Dieser [...] Bereich [...] ist offenbar das eigentliche Schutzholz.

Bei der Vermessung der Breite der Verletzung wurde festgestellt, dass sie mit 1,4 [cm] um 2,7 [cm] geringer als die entsprechende Kraterbreite von 4,1 [cm] ist. Die Wundgewebebildung wird in der Sagittal- und in der dreidimensionalen Darstellung hervorgehoben. Die ursprüngliche Verletzung, die von einem holzfreien Zwischenraum charakterisiert wird, liegt auf derselben Höhe wie der Mondkrater im Rindenbild. Das Wundgewebe reicht über diesen Bereich hinaus in den Holzkörper hinein. Infektionserreger können am leichtesten in Längsrichtung bei Rindenverletzungen des Baumes vordringen. Der Widerstand des Baumes durch seine gestreckten Zellen ist hier schwächer, als in radialer Richtung. Der Baum muss vor allem in diesen Bereichen Schutzmaßnahmen ergreifen, um ein weiteres Ausbrei-

ten von Fäulen zu verhindern (SHIGO, 1984). Die Ausdehnung des Schutzgewebes weit über die ursprünglich Zone der Verletzung hinaus wurde mit der Verwendung der Filterfunktionen des Softwareprogramms Volume Graphics StudioMax 1.0 bestätigt (NÄHER 2002).

5.5.5 Rotkern

Für die Rotkerndiagnose ist die CT schon erfolgreich erprobt worden (HABERMEHL UND RIDDER 1993; WIEBE 1992). Allerdings waren die verwendeten CT-Geräte noch nicht in der Lage eine sehr hohe Auflösung zu erreichen. Daher sind hier bei der rekonstruierten Darstellung des Rotkerns nicht nur sein Ausmaß im Stammquerschnitt sondern seine unterschiedlichen Grenzverläufe klar erfasst worden.

Die Darstellung des Rotkerns ist von der Lage der Schnittebene des Tomographen zur Hirnfläche des Abschnitts und zusätzlich von der Holzfeuchte abhängig. Beide genannten Faktoren liefern in der Darstellung des Rotkernes unterschiedliche Bildqualitäten. Bei einer Gleichgewichtsfeuchte zwischen Splint- und Kernbereich des Stammes, ist der Rotkern sehr gut an seinen hell dargestellten Grenzen zu erkennen, die eine höhere Dichte haben. Bei einem höheren Feuchtegehalt des Splintbereiches besitzt dieser in den Aufnahmen höhere Absorptionswerte und erscheint gegenüber dem rotkernigen Bereich heller.

SCHWARTZ-SPORNBERGER (1990) stellte in seiner Untersuchung fest, dass der Kern deutlich höhere Absorptionswerte habe. Dieses Phänomen kann mit den CT-Aufnahmen dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Allerdings zeigen sich höhere Absorptionswerte in den Grenzverläufen der einzelnen Rotkernzonen gegenüber dem umgebenden Holzbereichen. Hier liegt eine erhöhte Verthyllung in der Rotkerngrenze und eventuell zusätzlich auch eine erhöhte Einlagerung von Kernstoffen im Zelllumen vor.

Je weiter die Aufnahmen von den Hirnflächen des Rundholzkörpers entfernt durchgeführt wurden, umso geringer war der Kontrast des Übergangsbereiches vom Rotkern in den nicht rotkernigen Bereich.

NÄHER (2002) konnte nachweisen, das bei einem optischen Vergleich der Rotkerngrenzen anhand von digitalen Photos und CT-Aufnahmen eine sehr gute Ü-

bereinstimmung getroffen wurde. Dies bestätigt, dass die CT als Diagnoseinstrument besonders bei hoher Auflösung eine exakte Rotkernerfassung ermöglicht.

5.5.6 Dichteprofile

In den erstellten Dichteprofilen entlang der jeweiligen Messachsen sind die höheren Peaks der Dichtekurve nur bei zusätzlicher Verwendung der rekonstruierten Aufnahmen dem welligen Rotkerngrenzverlauf zuzuordnen. Problematisch hierbei ist der nicht ausschließlich dem Rotkern direkt zuzuweisende Dichtewertbereich, wie er sich in den Peaks widerspiegelt. Dieser Wertebereich kann auch von anderen Faktoren verursacht werden. Eine zweidimensionale Erstellung eines Dichteprofiles reicht nicht aus, um Aussagen über die Eigenschaften des Holzkörpers anhand von Dichteerhöhungen oder Dichteerniedrigungen treffen zu können.

Dieses trifft für alle untersuchten Parametern wie Astigkeit, Rotkern, Fäule, etc. zu. In allen erstellten und analysierten Dichteprofilen sind sowohl die Ausmaße von Dichteerhöhungen als auch ihre Ursachen im Holzkörper nur bei Kenntnis und Berücksichtigung der rekonstruierten Aufnahme lokalisier- und identifizierbar.

Die rekonstruierten Aufnahmen sind bestens für visuelle Diagnosen des Holzkörpers einsetzbar. Vor allem sind die Volumenaufnahmen für wissenschaftliche Fragestellungen von großem Nutzen, da bei Verwendung spezieller Software die gesamte dichte-abhängige Information des untersuchten Prüfkörpers analysiert werden kann.

5.5.7 Jahrringe

Die Jahrringstruktur wird realitätsgetreu in der rekonstruierten Aufnahme abgebildet, so dass u. a. der durch Äste oder andere Parameter beeinflusste wellige Verlauf deutlich zu erkennen ist. Die Jahrringgrenzen zeichnen sich in den Aufnahmen deutlich ab und sind klar zu unterscheiden. Für die Bestimmung der Jahrringbreiten ist allerdings die Verwendung eines Dichteprofiles nicht geeignet. Die Peaks der Dichtekurve entsprechen nicht immer den Jahrringgrenzen, da sie von anderen Faktoren überlagert und verwischt werden können (z. B. Rotkerngrenze).

5.5.8 Holzfeuchte

Schwierig bleibt zur Zeit die Bestimmung der Holzfeuchte mit der Verwendung von nur einer Aufnahme, ohne mindestens eine Referenzgröße zusätzlich gemessen zu haben. Die gemessenen Dichtewerte spiegeln die Volumeneinheit wider. Dieser Wert setzt sich aus allen Materialien, die in der Volumeneinheit enthalten sind, summarisch zusammen. Dabei können in Abhängigkeit der verwendeten Energie bei der Aufnahme auch die erhöhten effektiven Ordnungszahlen der Elemente den dargestellten Dichtewert beeinflussen. Positive als auch negative Kontraste sind bei höheren Strahlungsenergien zunehmend dichteabhängig (KALENDER, 2000).

5.5.9 Dichteerhöhungen im Holzkörper

Auffallend bei allen Aufnahmen ist, dass die Dichteerhöhungen unabhängig von ihrer Ausprägung immer räumlich sehr stark begrenzt sind (s. 5.5.1). Sie treten immer nur in wenigen Schichtaufnahmen bei den Untersuchungen mit dem Kegelstrahltomographen auf und sind i. d. R. in den räumlich vor- oder nachfolgenden Aufnahmen (z-Achse) nicht mehr vorhanden.

6 Ausblick

Wissenschaftliche Untersuchungen werden sich in Zukunft mit immer komplexeren Fragestellungen befassen, da die Produktionsbedingung der verarbeitenden Holzindustrien sich drastisch ändern (Einsatz von Informationstechnologien, flexiblere Produktionsprozesse, Entwicklung neuer Materialien, etc.). Um Einflussfaktoren auf Merkmalsausprägungen des nachwachsenden Rohstoffes Holz und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen bestmöglich zu erfassen und zu beschreiben, ist die Verwendung von hochauflösenden und kombinierten Ansätzen eine zwingende Voraussetzung.

Für die Holzverarbeitenden Industrie kann eine Analyse von Qualitätsmerkmalen mit der Kombination von zerstörungsfreien Prüfmethoden und traditionellen Untersuchungen (z. B. mechanisch, visuell, chemisch, etc.) dazu beitragen, z. B. neue Verfahren für die Rundholz-Charakterisierung in verarbeitenden Betrieben zu entwickeln.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein hochauflösendes Untersuchungskonzept exemplarisch an Fichten- und Buchenholz entwickelt und erprobt. Es wurde gezeigt, dass eine präzise Erfassung und Beschreibung der Rundholzqualität an Einzelbäumen für die Beantwortung verwendungsrelevanter Fragen möglich ist. Die holzkundlichen Analysen umfassten die radiale Jahrringmessung, die Rohdichte, die Biegefestigkeit, den Biege-E-Modul, die Astigkeit, das Reaktionsholz und den Rotkern, letzteren mit Hilfe von Computertomographen. Diese Qualitätsparameter haben eine große Verwendungsrelevanz, da sie den Einsatz des Rohstoffs determinieren.

Als Methoden wurden ‚klassische‘ Untersuchungen der Holzkunde wie z. B. die Biegeprüfung an fehlerfreien Proben oder die radiale Jahrringmessung durchgeführt. Zusätzlich wurden diese aber durch Verwendung von EDV-Programmen zu einer präzisen Analyse herangezogen, wie z. B. die Analyse des Einflusses der Jahrringbreite auf die Rohdichte. Die Verknüpfung von Einzelergebnissen von verschiedenen Untersuchungen zeigt, dass beispielsweise bei der radialen Rohdichteuntersuchung eine negative Korrelation zwischen Jahrringbreite und Rohdichte für die Fichte nicht verallgemeinert bestätigt werden kann.

Tabelle 36: Anzahl Prüfkörper für die einzelnen Untersuchungen

	N / Fichte	N / Buche
Biegeprüfung	2120	1391
Rohdichte radial	1447	./.
Im Holzkörper liegende Äste	828	./.
Chinesenbärte, Mondkrater	./.	1446
Reaktionsholz	403	./.
Jahrringmessung	403	335

Die Anwendung von Computertomographie für die Erfassung von Rundholzqualitätsparameter ist in der Vergangenheit schon erfolgreich durchgeführt worden. In dieser Arbeit konnten aber erstmals sehr hochauflösende Computertomographen für Volumenaufnahmen eingesetzt werden. Durch deren Einsatz konnte diese zer-

störungsfreie Prüfmethode für neue Anwendungen in der Wissenschaft und der Praxis unterstrichen werden.

Zusätzlich brachte die Anwendung von CT-Analyse-Software, die in erster Linie für medizinische Zwecke eingesetzt wird, neue Ergebnisse, die bisher noch nicht bekannt waren (z. B. parabelförmige Dichteerhöhungen).

Präzise Aussagen über die Rundholzqualität in unterschiedlicher Stammlage in Abhängigkeit der Baumhöhe und Himmelsrichtung können mit diesem Konzept getroffen werden. Das hochauflösende Untersuchungskonzept zeigt deutlich, dass Unterschiede in Merkmalsausprägungen von Holzqualitätsparametern im Einzelstamm in Baumhöhe und Himmelsrichtung auftreten können. Für die Verwendung des Einzelstammes können diese Unterschiede keine Bedeutung haben. Es treten aber innerhalb von Beständen Unterschiede zwischen den Bestandesmitgliedern auf, die eine differenzierte Verwendung des nachwachsenden Rohstoffs Holz wiederum begründen.

8 Literaturverzeichnis

- ABETZ, P.; KÜNSTLE, E. (1982): Zur Druckholzbildung bei Fichte. AFJZ 153, 117-127.
- BECKER, G. (1995): Waldbau und Holzqualität. Forst und Holz 50, 565 – 569.
- BECKER, G. (1999): Entwicklung der Holzqualität im deutschen Wald. Holz-Zentralblatt 142, S. 20-21
- BELLMANN, B. (1982): Untersuchungen an einem durch Druckholz stark verkrümmten Fichtenbrett. Diplomarbeit des Fachbereichs Forstwissenschaft der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- BERNHART, A. (1964): Waldbauliche Möglichkeiten einer Beeinflussung der Rohdichte von Fichtenholz. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayern, 34, 132-141.
- BÖHLMANN (1970): Anatomisch-histologische Untersuchungen im Bereich der Astabzweigungen bei Nadel- und Laubbäumen. – I. Die Verhältnisse im Abzweigungsbereich der Langtriebe von Nadelbäumen. AFJZ, 141, S. 134-140
- BOSSHARD, H. H. (1984): Holzkunde. Bd. 2 - Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. 2. Auflage Birkhäuser, Basel, Boston, Stuttgart 312 S.
- BRUNN, G. (1932): Jahrringbreite und Ästigkeit der Fichte. Forstliche Wochenzeitschrift Silva, 20, S. 153-160
- BUES, C. T., SCHULZ, H. (1989): Festigkeit und Feuchtegehalt von Buchenholz aus Waldschadensgebieten. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 47, Nr. 12, S. 515-520
- BUES, C.-T. (1990) : Untersuchung der Holzqualität von Fichten aus unterschiedlich weit begründeten Beständen. Habilitationsschrift an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der LMU München, 159 S.
- BUES, C.-T. (1996) : Zur Holzqualität weitständig gepflanzter und 'geschneitelter' Fichten aus dem Frankenwald. Forst und Holz, 51, S. 45-49

- BUNDESREGIERUNG (1969): Verordnung über gesetzliche Handelsklassen für Rohholz, geändert durch Verordnung vom 06.12.73. In: Rohholzsortierungsbestimmungen für den Gebrauch im bayerischen Staatswald. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München
- BURGER, H. (1940): Holz, Blattmenge und Zuwachs. 4. Mitteilung: Ein 80-jähriger Buchenbestand. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstwesen 21, 319 ff
- BURGER, H. (1953): Holz, Blattmenge und Zuwachs – Fichten im gleichaltrigen Hochwald. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für Forstliches Versuchswesen, 29, 38-130.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (1976): DIN 52182 - Bestimmung der Rohdichte. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth, Berlin, Köln 3 S.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (1978): DIN 52186 - Biegeversuch. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth, Berlin, Köln 3 S.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (1997): DIN EN 1316-1 - Laub-Rundholz - Qualitäts-Sortierung. Teil 1: Eiche und Buche. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth, Berlin 5 S.
- DÜRRSTEIN, H. (1984): Untersuchung von Beziehungen zwischen Rundholzmerkmalen und Schnittholzqualität bei Fichte zur Erstellung von Gütefunktionen.
- FRÜHWALD, A., BAUCH, J., PULS, J., MEHRINGER, H., SCHWAB, E. (1988): Die Qualität des Holzes von Buchen aus Waldschadensgebieten. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg Nr. 160, S. 153-173
- GABER, E. (1937): Eigenschaften und Bewertung von in- und ausländischem Nadelnutzholz. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 1; S. 83-87

- GIEFING, D., LEWARK, S. (1990): Rohdichteuntersuchungen von Buchen in Berliner und nordpolnischen Beständen. Forstarchiv, Jg. 61, Nr.1, S. 6-10
- GLOS, P., REITER, J., WEGENER, G. (2003): Starkholzvermarktung – Analyse der Holzqualität von Fichten- Starkholz. Abschlussbericht Nr. 02510. Holzforschung München, S. 48
- GLOS, P., LEDERER, B. (2000): Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte. Abschlussbericht des Instituts für Holzforschung der TU München Nr. 98508
- GLOS, P., TRATZMILLER, M. (1997): Qualität von Schnittholz Bayerischer Fichten aus Lichtwuchsbetrieb im Vergleich zu Schnittholz aus Beständen mit niederdurchforstungsartiger Behandlung. Abschlussbericht 96511 der Bayer. Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft zum Kuratoriumsprojekt X31. S. 74
- GLOS, P., TRATZMILLER, M. (1996): Erzeugung von höherwertigem Bauschnittholz aus Starkholz. AFZ/Der Wald 51. Jg.: 1230-1231.
- GLOS, P., TRATZMILLER, M. (1996a): Höherwertige Starkholznutzung durch verbesserte Einschnitt- und Sortierverfahren. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt X25. Institut für Holzforschung München, 105 S.
- GÖHRE, K., GÖTZE, H. (1956): Untersuchungen über die Rohwichte des Rotbuchenholzes. Archiv für Forstwesen Nr. 5, S. 716-748
- GÖHRE, K. (1958): Über die Verteilung der Rohwichte im Stamm und ihre Beeinflussung durch Wuchsgebiet und Standort, Holz Roh- Werkstoff, 16, S. 77-90
- GRAMMEL, R. (1995): Holzqualität im Spannungsfeld zwischen Waldbau und Ansprüchen der Holzindustrie. Referat, gehalten anlässlich des Festkolloquiums zu Ehren von Professor Dr. Wolfgang Knigge am 25. April 1995 in Göttingen. Forst und Holz, 50, 250

- GRAMMEL, R. (1990): Zusammenhänge zwischen Wachstumsbedingungen und holztechnologischen Eigenschaften der Fichte. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 109, S. 119-129
- GRAMMEL, R.H., SEYFERT, D., GROß, M. (1988): Der Einfluss des Standorts auf die technologischen Holzeigenschaften der Fichte (*Picea abies* Karst.). Holz Roh- Werkstoff, Jg. 46, S. 191
- GRAMMEL, R. H., GROOS, A., HÖWECKE, B. (1989): Darr- Rohdichte bei Buche in Abhängigkeit von Meereshöhe, Alter und Wuchsleistung. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 47, S. 34
- GRÖßLER (1943): Holztechnologische Untersuchungen an Hochgebirgsbuchen. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 6, S. 81-86
- GROSSER, D., ZIMMER, B. (1998): Informationsdienst Holz: Einheimische Nutzhölzer und ihre Verwendung. Hrsg.: Entwicklungsgemeinschaft Holzbau EHG
- GÜNSCHE, F. (2000): Verwendungsrelevante Qualitätsparameter von Buchenholz. Diplomarbeit, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement Weihenstephan
- HABERMEHL UND RIDDER (1993): Anwendungen der mobilen Computertomographie zur zerstörungsfreien Untersuchung des Holzkörpers von stehenden Bäumen. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 51, S. 101-106
- HARRIS, J.M. (1967): Latewood, earlywood, and wood density. Ref. 14. IUFRO-Kongreß, München, Bd. 9, S. 56 – 69
- HARTIG, R., WEBER, R. (1888): Das Holz der Rothbuche in anatomisch-physiologischer, chemischer und forstlicher Richtung. J. Springer, Berlin, S. 238.
- KALENDER, W. A. (2000): Computertomographie, Publicis MCD, München; 216 S.
- KAPPENBERG, K. (1994): Erstellung einer exemplarischen Vergleichsstudie für sowohl durch Computertomographie-, als auch durch Wasserverdrängungsmethode ermittelte Dichteparameter an Holzproben der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*

FRANCO). Diplomarbeit des forstwissenschaftlichen Fachbereichs der Georg-August-Universität Göttingen.

KELLER, R., LE TACON, F., TIMBAL, J. (1976): La densité du bois de hêtre dans le nord - est de la France. Influence des caractéristiques et du type de silviculture. Annales Des Sciences Forestières, Jg. 33, S. 1-17

KENNEL, R. (1965): Untersuchungen über die Leistung von Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand. AFJZ 136, 149-161 u. 173-189

KNIGGE, W., SCHULZ, H. (1966): Grundriß der Forstbenutzung. Paul Parey, Hamburg 584 S.

KNIGGE, W. (1958): Das Phänomen der Reaktionsholzbildung und seine Bedeutung für die Holzverwendung. Sonderdruck aus ‚Forstarchiv‘ 29, S. 4-10

KÖLBL, M. (1994): CT-Messungen zur Bestimmung des Rotkerns an Buche und weitere Einsatzmöglichkeiten in der Naturwaldforschung. Dokumentation des Workshops: Die Computer-Tomographie als diagnostische Methode bei der Untersuchung von Bäumen. Hess. Forstl. Versuchsanst. Hann.-Münden und Medizinische Physik im Radiologie Zentrum der Philipps-Universität Marburg/Lahn

KÖSTER, D. (1934): Die Astreinigung der Fichte. Mitt. Forstwiss.-Forstwirtsch. Heft 3, S. 393-416

KOLLMANN, F. (1936): Technologie des Holzes. Springer, Berlin 764 S.

KOLLMANN, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Auflage, 1.Bd. Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1951

KOLLMANN, F., KISSELOFF, P. (1966): Physikalische und mechanische Eigenschaften der Rotbuche. Holz-Zentralblatt, 1966, Nr. 149, S. 2609-2612

KOLLMANN, F. (1968): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 1. Aufl., 1. Bd. Reprint. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, S. 1048

- KOLTZENBURG, C. (1966): Die Abhängigkeit der Holzeigenschaften der Rotbuche (*Fagus silvatica* L.) von Lichtgenuß, soziologischer Stellung und anderen Wuchsbedingungen. Dissertation der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen 121 S.
- KOLTZENBURG, C, KNIGGE, W. (1987): Holzeigenschaften von Buchen aus immissionsgeschädigten Beständen. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 45, S. 81-87
- KRAMER, H.; DONG, P. H.; RUSACK, H.J.(1971): Untersuchung der Baumqualität in weitständig begründeten Fichtenbeständen. AFJZ, 142; S. 33-46
- KREMPL, H. (1977): Gewicht des Fichtenholzes in Österreich, AFZ 88, S. 76 - 81
- KUCERA, L. J., BARISKA, M. (1982): Zur Topographie der Holzeigenschaften im Baumkörper. Forstarchiv, Jg. 53, S. 136-141
- LEINERT, S. (1962): Die Bedeutung der Rohwichte für die Beurteilung des Zuwachses bei Fichte. Freiburg. Forstl. Diss., Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 157 S.
- LEWARK, S. (1981): Untersuchungen von Holzmerkmalen junger Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) – Jahrringbreite, Rohdichte und Ästigkeit von Stecklingsklonen. Dissertation an der Forstlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen, 193 S.
- LEWARK, S. (1987): Untersuchungen an Buchenbeständen Nordwestdeutschlands über die Variation der Rohdichte. Schriften der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der niedersächsischen forstlichen Versuchsanstalt Nr. 88, Sauerländer, 118 S.
- LIPPEMEIER, P. (1972): Untersuchungen über die Schnittholzqualität von Weißtannen im Hinteren Bayerischen Wald. Dissertation Universität München.
- LÖFFLER, H.D. (1966): Einflüsse auf den Wert des Rundholzes, untersucht am Beispiel des Sägerundholzes der Weißtanne. Habilitationsschrift, Freiburg i.Br.

- MAHLER, G., KLEBES, J., HÖWECKE, B. (1988): Holztechnologische Eigenschaften von Buchen mit neuartigen Waldschäden. Holz-Zentralblatt, Nr. 28, S. 402-404
- MAHLER, G., WILLMAN, U., WURSTER, M. (2001): Güteansprache am stehenden Stamm – Bundeswaldinventur II in Baden-Württemberg. Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abt. Arbeitswissenschaft und Forstbenutzung.
- MARCHAND, G.E. (1982): Vergleichende Untersuchungen des Biegeverhaltens von kleinen, fehlerfreien Fichtenholzproben und großen Fichtenbalken. Thèse No. 456, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. S. 107
- MÜNCH (1937): Entstehungsursachen und Wirkung des Druck- und Zugholzes der Bäume. Silva 25, 337-344 und 345-352
- NÄHER, T. (2002): Untersuchungen zum Einsatz der Computertomographie für die Erfassung von Holzqualitätsparametern an der Buche (*Fagus sylvatica* L.). Diplomarbeit der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement der Technischen Universität München.
- NIEMZ, P., KUCERA, L. J., FLISCH, A., BLASER, E. (1997): Anwendung der Computertomographie an Holz. Holz Roh- Werkstoff 55, 279-280
- OLESEN, P. O. (1976): The interrelation between basic density and ringwidth of Norway Spruce. Det forstige Forsogsvaesen in Denmark, 34: 282, 340-359.
- POPPER, R., EBERLE, GERHILD (1992): Vergleich der Holzeigenschaften gesunder und geschädigter Buchen (*Fagus sylvatica* L.): Physikalisch-mechanische Eigenschaften. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, Jg. 143 (5), S. 333-338
- PRETZSCH, H. (2001): Modellierung des Waldwachstums. Parey Buchverlag Berlin, 341 S.
- SACHSSE, H. (1973): Eigenschaftsunterschiede von Buchen-Industrieholz aus Schaft- und Kronenbereich. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 31, S. 299-306
- SACHSSE, H. (1991): Kerntypen der Rotbuche. Forstarchiv, Jg. 62, S. 238-242

- SAUTTER, I. (2000): Darstellung der Feuchte- und Dichteverteilung in ausgewählten einheimischen Baumarten mit Hilfe der Computertomographie. Diplomarbeit, Studienfakultät Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement Weihenstephan.
- SCHLEICHER, H. (1935): Untersuchungen über die Abhängigkeit des Raumgewichtes des Buchenholzes von der Stammform. Dissertation, Hann.-Münden: M.und H. Schaper Hannover
- SCHÜTZ, J.-P. (1998): Behandlungskonzepte der Buche aus heutiger Sicht. Schweiz. Z.Forstwes. 149, 12: S. 1005-1030
- SCHULTZE-DEWITZ, G. (1959): Variation und Häufigkeit der Faserlänge der Fichte. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 17, S. 319 – 326
- SCHULZ, H. (1961): Die Beurteilung der Qualitätsentwicklung junger Bäume. Forstarchiv, Jg. 32, S. 89-99
- SCHULZ, H. (1986): Untersuchungen über die Holzqualität in bayerischen Fichtenbeständen. Forschungsbericht Institut für der LMU München, 44 S.
- SCHULZ, H., SCHUMACHER, P., WEGENER, G. (1997): Anwendbarkeit und Auswirkungen der Qualitätssortierung von Fichtenrundholz nach dem Normentwurf prEN 1927-1. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt ST 28 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 42 S.
- SCHUMACHER, P. (1993): Qualitätsvergleich zwischen nordischem und bayerischem Schnittholz. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der LMU München, 169 S.
- SCHUMACHER, P., RITTER, U., SCHULZ, H., WEGENER, G. (1997): Qualitätssortierung von Fichtenstammholz nach dem Europäischen Normentwurf prEN 1927-1 (Teil 1 und 2). Holz-Zentralblatt 123, Jg. Nr. 74: S. 1137-1139 und Nr. 76: S. 1191.
- SCHUMANN, G. UND DIMITRI, L. (1993): Wunden und Wundfäule bei der Buche. AFZ, Jg.48, S. 456-460

- SCHWARTZ-SPORNBERGER, V. (1990): Untersuchungen an Bäumen mit Hilfe eines Computer-Tomographen. Dissertation, Philipps-Universität Marburg/Lahn
- SCHWAPPACH, A. (1894): Beiträge zur Kenntniß der Qualität des Rothbuchenholzes. Zeitschr. f. Forst- und Jagdwesen, Jg. 26, Nr. 9, S. 513-539
- SEELING, U. (1999): Einfluß von Richtgewebe („Druckholz“) auf Festigkeit und Elastizität des Fichtenholzes. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 57, S. 81-91
- SEELING, U. (2001): Merkmale und verwendungsbezogene Eigenschaften des Holzes der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) bei Überführung von einschichtigen Reinbeständen in strukturierten Mischbestände. Habilitationsschrift, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
- SHIGO, A. L. (1984): Compartmentalization: A conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. Can. Rev. Phytopathol. 22, S. 189-214
- SÜß, H., MÜLLER-STOLL, W. R. (1972): Zusammenhänge zwischen der Ausbildung einiger Holzmerkmale der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) und der Jahrringbreite. Holz Roh- Werkstoff, Jg. 30, Nr. 9, S. 342-346
- STERN, K. (1961): Einfluß der Himmelsrichtung auf die Verteilung der Raumdichte des Holzes in Fichtenbeständen. Holzforschung, Bd. 17, S. 6-12.
- TIMELL, T. E. (1986): Compression Wood in Gymnosperms. Vol.1-3. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 2150 S.
- TRENDELENBURG, R. (1937): Über Stammwuchsuntersuchungen und ihre Auswirkungen in der Holzforschung. Holz Roh- Werkstoff, 1.Jg, Heft 2, S.3 - 13
- TRENDELENBURG, R.; MAYER-WEGELIN (1955): Das Holz als Rohstoff, Carl Hanser Verlag, München, 541 S.
- v. AUFSESS, H. (1975): Über die Bildung einer Schutzsperre an der Astbasis von Laub- und Nadelbäumen und ihre Wirksamkeit gegen das Eindringen von

Pilzen n das Kernholz lebender Bäume. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 94, S. 140-152.

- v. DROSTE ZU HÜLSHOFF, B. (1970): Über die Kronenstruktur in einem älteren Fichtenbestand. AFJZ, 141, S. 253-256
- v. MALDEGHEM, U. (2000): Entwicklung einer Sortiervorschrift für Buchen-Brettlamellen. Diplomarbeit der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität München.
- v. PECHMANN, H. (1958): Die Auswirkungen der Wuchsgeschwindigkeit auf die Holzstruktur und die Holzeigenschaften einiger Baumarten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, Jg. 109 (11), S. 615-647
- v. PECHMANN, H. (1961): Die Struktur des Holzes als Qualitätsmerkmal. AFZ, 16, S. 567-571
- v. PECHMANN, H. (1974): Der Einfluß der Durchforstung auf die Holzqualität. Forstarchiv, Jg. 45, S. 34-38
- v. PECHMANN, H., v. AUFSESS, H., BERNHART, A. (1963): Die Holzeigenschaften der Rotbuche im inneren bayerischen Wald. Forstwissenschaftliches Zentralblatt, Jg. 82, S. 12-26
- v. PECHMANN, H. & SHAILE, O. (1955): Die Auswirkungen der waldbaulichen Behandlung auf die Holzeigenschaften der Fichte – untersucht am Beispiel einiger oberschwäbischer Fichtenbestände, Forstwissenschaftliches Centralblatt, 74, S. 305 – 318.
- WAGENFÜHR, R.; SCHEIBER, C. (1985): Holzatlas. 2.Aufl., Fachbuchverlag Leipzig, 720 S.
- WEIDNER, U., SCHUMACHER, P., RITTER, U., RATHKE, K.-H., MAHLER, G., WEGENER, G. (1999): Rundholzsortierung nach den Europäischen Normen. Holz-Zentralblatt Nr. 145, 1999, S. 1950-1951
- WEIDNER, U., SCHUMACHER, P., RITTER, U., WEGENER, G. (2000): Rundholzsortierung nach den Europäischen Normen (2). Holz-Zentralblatt, Nr. 96, 2000, S. 1238 u. 1240

- WERNDÖRFER, H. (2001): Untersuchung über die Bildung von Reaktionsholz und Harzgallen in besonders weitständig erwachsenen, geästeten Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) – unter Anwendung eines digitalen Bildauswertungsverfahrens. Diplomarbeit, Freiburg i. B.
- WIEBE, S. (1992): Untersuchungen zur Wundentwicklung und Wundbehandlung an Bäumen unter besonderer Berücksichtigung der Holzfeuchte. Dissertation, Forstwissenschaftliche Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- WOBST, H. (1967): Auswirkungen der Rotverkernung von Buchenstammholz auf einige kennzeichnende physikalische und mechanisch-technologische Eigenschaften. XIV. IUFRO-Kongress, München 1967 Bd. 9, S. 179-209
- ZHANG, S.Y. (1997): Variations and correlations of various ring width and ring density features in European oak: implications in dendroclimatology. *Wood Science and Technology*, 31, S. 63-72.