

SCHRIFTENREIHE
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

BAND 35

Bertil Burian

**Verbesserung der Rundholzvorsortierung
durch die automatisierte Bestimmung
von Holzstrukturmerkmalen am Beispiel der
durchschnittlichen Jahrringbreite [mm]
unter Einsatz der Röntgentechnologie**

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG
ABTEILUNG WALDNUTZUNG

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zitiervorschlag:

Burian, Bertil (2006): Verbesserung der Rundholzvorsortierung durch die automatisierte Bestimmung von Holzstrukturmerkmalen am Beispiel der Jahringbreite [mm] unter Einsatz der Röntgentechnologie. Freiburg: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Bd. 35) Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2006)

ISSN 1436-1566

ISBN 3-933548-36-5

Die Herausgeber:

Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Redaktionskomitee:

Prof. Dr. J. Huss

Prof. Dr. W. Konold

Dr. K. v. Wilpert

Dr. H. Volk

Umschlaggestaltung:

Bernhard Kunkler Design, Freiburg

Druck:

Eigenverlag der FVA, Freiburg

Bestellungen an:

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Wonnhaldestraße 4

79100 Freiburg i. Br.

Tel. 0761/4018-0, Fax 0761/4018-333

E-Mail: fva-bw@forst.bwl.de

Internet: www.fva-bw.de

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Gedruckt auf 100 % chlorfrei gebleichtem Papier

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum zwischen Oktober 2003 und März 2006 in der Abteilung Waldnutzung der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg im Breisgau unter externer Anleitung von Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker, Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Fakultät für Umwelt- und Forstwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker gilt mein ganz besonderer Dank für die ausgezeichnete Betreuung dieser Arbeit und die fachlichen Anregungen. Herrn Prof. Dr. Heinrich Spiecker danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats.

Herrn Dr. Udo-Hans Sauter sowie Herrn Dr. Gerold Mahler danke ich für die eingeräumte Möglichkeit eine Dissertation aus Teilen meiner Projektarbeit an der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg anfertigen zu können. Für ihre darüber hinaus gehende Unterstützung und ihre konstruktiven Anregungen spreche ich Ihnen meinen herzlichen Dank aus.

Mein Dank gilt ebenfalls allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilung Waldnutzung der FVA Freiburg, die mir in allen Phasen dieser Arbeit stets zur Seite standen.

Frau Dr. Franka Brüchert und Herrn Dr. Bernhard Bösch danke ich für die fachlichen Diskussionen und Anregungen sowie für die statistische Beratung.

Mein ganz besonderer Dank gebührt meiner Frau Heike für den Rückhalt und die Akzeptanz, die sie mir während der letzten zweieinhalb Jahre zukommen ließ. Meinen Eltern danke ich für die Unterstützung in all den Jahren meiner Ausbildung.

Bertil Burian

Freiburg i. Br. im März 2006

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2	STAND DES WISSENS	5
2.1	ALLGEMEINE EINFÜHRUNG IN DIE RÖNTGENTECHNOLOGIE	5
2.2	EINSATZGEBIETE DER RÖNTGENTECHNOLOGIE AUßERHALB DER FORST- UND HOLZWIRTSCHAFT	10
2.3	EINSATZGEBIETE DER RÖNTGENTECHNOLOGIE IN DER FORST- UND HOLZWIRTSCHAFT	13
2.3.1	Röntgentechnologische Erkennung von Holzstrukturmerkmalen in der Materialforschung und in Industrieanwendungen	13
2.3.2	Röntgentechnologische Erkennung von Holzstrukturmerkmalen an Bäumen mit mobilen Röntgengeräten	14
2.3.3	Röntgentechnologische Erkennung von Holzstrukturmerkmalen in der Sägeindustrie	16
3	ZIELSETZUNG UND VERSUCHSKONZEPT	22
4	MATERIAL UND METHODEN	23
4.1	MATERIAL	23
4.1.1	Versuch 1 – Vorversuch zur Abschätzung der technischen Möglichkeit zur Messung der Jahrringbreite	23
4.1.2	Versuch 2	25
4.1.3	Versuch 3a	26
4.1.4	Versuch 3b	29
4.2	METHODEN	31
4.2.1	Definition Jahrring	31
4.2.2	Datenaufnahme Rundholz	32
4.2.2.1	Auswahlkriterien	32
4.2.2.2	HKS – Gesetzliche Handelklassensortierung für Rohholz	32
4.2.2.3	ENV 1927-1 – Qualitätssortierung von Fichten und Tannen	33
4.2.3	Datenaufnahme TOMOLOG	33
4.2.3.1	Technische Daten des TOMOLOGs	34
4.2.3.2	Verfahren der maschinellen Jahrringbreitenmessung	35
4.2.4	Datenaufnahme Dimensionsvermessung	37

4.2.5	Datenaufnahme manuell ermittelte Jahrringbreite	37
4.2.6	Datenaufnahme Exzentrizität und Ovalität	40
4.2.7	Datenaufnahme Holzfeuchte	40
4.2.8	Datenaufnahme Holzdicke	41
4.2.9	Datenaufnahme Druckholz, Rindeneinschlüsse und Harzgallen	42
4.2.10	Datenauswertung	42
4.2.10.1	Statistische Methoden	42
4.2.10.2	Korrelationsanalyse nach PEARSON	43
4.2.10.3	Linear, einfach und multiple Regressionsanalyse	43
4.2.11	Plausibilitätsprüfung	44
5	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	45
5.1	VERSUCH 1	45
5.1.1	Besonderheiten des Versuchs 1	45
5.1.2	Technische Leitungsfähigkeit des Messalgorithmus	46
5.1.3	Prüfung der Reproduzierbarkeit von maschinell ermittelten Jahrringbreiten je Rundholzabschnitt	49
5.1.4	Vergleich der manuell und maschinell ermittelten Jahrringbreite	51
5.1.5	Rundholzvorsortierung	56
5.1.6	Einfluss von Rundholzdimension und Holzstrukturmerkmalen auf die maschinelle Messung der Jahrringbreite	58
5.2	VERSUCH 2	70
5.2.1	Besonderheiten des Versuchs 2	70
5.2.2	Technische Leistungsfähigkeit des Messrahmens	71
5.2.3	Prüfung der Reproduzierbarkeit von maschinell ermittelten Jahrringbreiten je Rundholzabschnitt	74
5.2.4	Vergleich der manuell und maschinell ermittelten Jahrringbreite	76
5.2.5	Rundholzvorsortierung	81
5.2.6	Einfluss von Rundholzdimension und Holzstrukturmerkmalen auf die maschinelle Messung der Jahrringbreite	83
5.3	VERSUCH 3a	93
5.3.1	Besonderheiten des Versuchs 3a	93
5.3.2	Technische Leistungsfähigkeit des Messalgorithmus	93
5.3.3	Vergleich der manuell und maschinell ermittelten Jahrringbreiten	96
5.3.4	Rundholzvorsortierung	101
5.3.5	Einfluss von Rundholzdimension und Holzstrukturmerkmalen auf die maschinelle Messung der Jahrringbreite	104

5.4	VERSUCH 3b	116
5.4.1	Besonderheiten des Röntgenmessversuchs 3b	116
5.4.2	Technische Leistungsfähigkeit des Messalgorithmus	117
5.4.3	Vergleich der manuell und maschinell ermittelten Jahrringbreiten	120
5.4.4	Rundholzvorsortierung	124
5.4.5	Einfluss von Rundholzdimension und Holzstrukturmerkmalen auf die maschinelle Messung der Jahrringbreite	127
6	ZUSAMMENFASSENDEN DISKUSSION ALLER VERSUCHS- ERGEBNISSE; SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	139
7	ZUSAMMENFASSUNG	151
8	SUMMARY	154
9	TABELLENVERZEICHNIS	156
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	162
11	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	167
12	LITERATURVERZEICHNIS	168
13	ANHANGVERZEICHNIS	194
14	ANHÄNGE	CD

7 ZUSAMMENFASSUNG

Die deutsche Sägeindustrie ist derzeit durch einen starken Strukturwandel geprägt, der vor allem durch eine Konzentration auf wenige Betriebe mit hoher Verarbeitungskapazität (> 500.000 Fm) gekennzeichnet ist. Mit einer Zunahme der Schnittholzproduktion auf über 20 Mio. m³ im Jahr 2005 (LÜCKGE 2006) ging eine Reduktion der Anzahl der Betriebe einher. Als Ursache für diesen dynamischen Prozess sind sowohl veränderte Kundenwünsche hinsichtlich standardisierter Produkte (z. B. Konstruktionsvollholz) als auch die zunehmende Globalisierung der Schnittholzmärkte zu nennen. Für das einzelne Sägewerk bedeutet dies den Zwang, die Produktion in allen Bereichen des Betriebes ständig zu optimieren und damit dem Bedarf anzupassen.

In der Erkennung und Messung innerer Qualitätsmerkmale (z. B. Jahrringbreite oder Äste) von Rundholzabschnitten wird in Kombination mit der Erfassung der äußeren Qualität (Krümmung, Abholzigkeit, Ovalität) und der Dimension (Länge und Zopfdurchmesser) ein großes Einsparpotential an Produktionskosten infolge einer qualitätsdifferenzierteren Vorsortierung von Rundholzabschnitten gesehen. Die sich ergebenden Optimierungspotentiale im Sägewerk liegen in einer höheren Wertschöpfung. Die Informationen über die äußere und innere Qualität führen zu einem „gläsernen Stamm“ und ermöglichen damit zu Beginn des Produktionsprozesses im Sägewerk eine optimale Zuordnung des Stammabschnitts zu einem möglichst hochwertigen Schnittholzprodukt. Somit führt die Vorsortierung von Rundholzabschnitten zu qualitativ homogeneren Rundholzlosen, die entsprechend ihrer Qualität differenzierter eingeschnitten werden können (z. B. Schnittholz für konstruktive Verwendungen). Aufgrund des geringeren Verschnitts ergibt sich eine höhere Schnittholzausbeute, was wiederum zu niedrigeren Einschnittskosten führt. Schließlich kann der Rohstoffeinsatz zur Herstellung einer Schnittholzprodukt - Einheit aufgrund der höheren Ausbeute reduziert werden. Dies führt ebenfalls zu Einsparungen von Rohstoffkosten, die heute über 50 % der Gesamtproduktionskosten ausmachen.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die automatisierte Erkennung innerer Holzstrukturmerkmale in Rundholzabschnitten am Beispiel der durchschnittlichen Jahrringbreite mit Hilfe eines Röntgenscanners untersucht. Die Erkennung und Messung der Jahrringbreite wurde dabei an Fichten- (*Picea abies*) und Tannen- (*Abies alba*) Stammabschnitten mit dem (diskreten) Röntgenmessrahmen TOMOLOG der Firma *Microtec*, Brixen durchgeführt. Die Ermittlung der Jahrringbreite fand hierbei zum ersten Mal in Echtzeit (online) unter den im Sägewerk üblichen Produktionsbedingungen (220 m/min) statt. Ziel der Untersuchung waren die Ermittlung und Quantifizierung von Einflussgrößen auf die vom TOMOLOG durchgeführten Messungen sowie die Ermittlung der Exaktheit einer Vorsortierung von Rundholzabschnitten in zwei Kollektive auf Basis der maschinell ermittelten Jahrringbreite.

Das Versuchsmaterial bestand aus 411 Fichten (99 %) und Tannen- (1 %) Rundholzabschnitten (Standardlänge 3 bis 6 m), die Jahrringbreiten von 1 mm bis 9 mm besaßen und somit die im süddeutschen Raum vorkommende Merkmalsausprägung in der Jahrringbreite repräsentierten. Die Verteilung der in der Untersuchung vorliegenden Mittendurchmesser entsprach der in einem Großsägewerk (Spanertechnologie) angelieferten Bandbreite von 10 cm o.R. bis 55 cm o.R.

Die an den Rundholzabschnitten und Holzproben erhobenen Messdaten wurden in einer Datenbank aufbereitet und mit Hilfe der Software SAS (Version 8.1) statistisch ausgewertet. Neben deskriptiven Datenanalysen z. B. über die Anzahl von Einzelmessungen je Rundholzabschnitt, über die Messrate in der Bestimmung der Jahrringbreite je Versuchskollektiv oder über die Exaktheit der maschinellen Jahrringbreitenmessung, wurden lineare einfache und multiple Korrelations- und Regressionsanalysen durchgeführt, mit deren Hilfe ein potentieller Einfluss der aufgenommenen Kriterien auf das Ergebnis der maschinell bestimmten Jahrringbreite untersucht wurde.

Die Ergebnisse der Datenauswertungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Unabhängig von der Jahreszeit wurden für durchschnittlich 98 % aller Rundholzabschnitte eine maschinelle Bestimmung der Jahrringbreite durchgeführt. Ein Einfluss der Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur) auf die Ermittlung der Jahrringbreite konnte aufgrund der jeweils ähnlich hohen Messraten (= Prozent der ermittelten Jahrringbreiten je Rundholzkollektiv) ausgeschlossen werden. Dies wurde ebenfalls durch die ermittelten Grunddaten bestätigt, die in allen Versuchen eine durchschnittliche Anzahl von potentiell möglichen Messungen je Rundholzabschnitt zwischen 30 % und 32 % aufwiesen.

Eine Messwiederholung der Rundholzabschnitte ergab eine hohe Übereinstimmung der maschinell ermittelten Jahrringbreiten je Rundholzabschnitt. Die durchschnittliche Standardabweichung war mit $s = 0,10$ mm (Versuch 2) beziehungsweise $s = 0,12$ mm (Versuch 1) sehr gering und zeigt, dass eine äußerst geringe Streuung in den Messwerten je Rundholzabschnitt vorliegt. Das bedeutet, dass eine reproduzierbare Messung der Jahrringbreite je Rundholzabschnitt, unabhängig der Anzahl von Messdurchläufen, vorliegt.

In den Versuchen wurden vom TOMOLOG Jahrringbreiten zwischen 2,40 mm und 8,30 mm ermittelt. Ein Zusammenhang zwischen der Spannweite der jeweils maschinell und manuell bestimmten Messwerte konnte festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigten darüber hinaus eine Zunahme in der Streuung der maschinell ermittelten Jahrringbreiten mit steigender manuell gemessener Jahrringbreite.

Die für die Beziehung zwischen der manuell und der maschinell ermittelten Jahrringbreite festgestellten Korrelationskoeffizienten wiesen Werte zwischen $r = 0,3$ (Versuch 2) und $r = 0,81$ (Versuch 1) auf. Die Enge der Beziehung hing stark von der Spannweite und der Verteilung der manuell bestimmten Messwerte ab. Straffe lineare Zusammenhänge (Versuch 1, 3a und 3b) wurden mit Annäherung an die Gauß'schen Verteilung der Rundholzabschnitte über die gesamte Spannweite der Merkmalsausprägung der Jahrringbreite (1 mm bis 8 mm) festgestellt. Die Lage der manuellen Messung im Rundholzabschnitt hatte ebenfalls einen Einfluss auf die Enge des Zusammenhangs zwischen der manuell und der maschinell ermittelten Jahrringbreite. Je näher die manuelle Messung am Zopfende eines Rundholzabschnitts lag, desto stärker war der lineare Zusammenhang.

Eine auf Basis der maschinell ermittelten Jahrringbreite durchgeführte Vorsortierung von Rundholzabschnitten in zwei Kollektive zeigte in Abhängigkeit des gewählten Grenzwerts (3 mm, 4 mm oder 5 mm) für 55 % bis 93 % aller Rundholzabschnitte eine korrekte Zuordnung in die jeweiligen Kollektive. Bei Versuchskollektiven mit einer annähernden Normalverteilung der Stammabschnitte in Bezug auf die Jahrringbreite (Versuch 1, 3a und 3b) wurden zwischen 70 % und 89 % aller Rundholzabschnitte korrekt vorsortiert.

Die maschinelle Messung der Jahrringbreite war statistisch signifikant beeinflusst ($\alpha = 0,05$) durch die Parameter „Mitten-“ und „Zopfdurchmesser“, „Holzdichte“, „Holzfeuchte“, „Druckholz“, „Exzentrizität“ und „physikalische Länge“. 45 % bis 83 % der Gesamtstreuung der maschinell bestimmten Messwerte konnten mit dem in der multiplen Regression verwendeten Modell durch die unabhängigen Variablen „manuell ermittelte Jahrringbreite“, „Zopfdurchmesser“, „Holzdichte“, „Holzfeuchte“ und „Druckholzanteil“ erklärt werden. Ein Einfluss des Druckholzanteils war jedoch nur in einem Versuch nachweisbar.

Ein linearer Zusammenhang konnte zwischen den Variablen „Mitten-“ und „Zopfdurchmessern“, dem „Druckholzanteil“, der „Holzdichte“ sowie der „Holzfeuchte“ und der Messdifferenz zwischen den maschinell und manuell ermittelten Jahrringbreiten ($\Delta = \text{maschinell} - \text{manuell}$) festgestellt werden. Mit Hilfe dieser unabhängigen Variablen konnten in der multiplen Regression zwischen 39 % und 65 % der Varianz in den Werten der Jahrringbreitendifferenz erklärt werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, dass eine Erkennung und Messung der Jahrringbreite unter den im Sägewerk gegebenen Produktionsbedingungen (220 m/min) mit dem Röntgenmessrahmen TOMOLOG möglich ist. Die ermittelte Abhängigkeit zwischen der Stammdimension und der maschinellen Jahrringbreitenmessung kann technisch gelöst werden. Insgesamt bestätigen die mittels TOMOLOGs gewonnenen Ergebnisse die aus der Literatur bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Röntgenstrahlenabsorption.

Auf Grundlage der dargestellten Resultate ist eine Weiterentwicklung der Holzdichtemesung möglich, die zu einer Verfeinerung der automatisierten Messung der Jahrringbreite führt. Darüber hinaus ermöglicht eine differenziertere Messung der Holzdicke die Erkennung und Messung weiterer Holzstrukturmerkmale, wie z. B. Äste, so dass zukünftig der Produktionsprozess weiter optimiert und die Wertschöpfung erhöht werden kann.

8 SUMMARY

The German sawmill industry is currently undergoing a remarkable change of structure, characterised by the concentration of a small number of sawmills with a high capacity of processing ($> 500.000 \text{ m}^3$). In 2005 the production of sawn wood increased to 20 Mio. m^3 whilst the number of sawmills decreased. The requirements for these dynamic processes are through changing customer demands for standardised sawn products, as well as the increasing globalisation of sawn wood markets. This means there is a compulsion for every sawmill, to continuously optimize their production in all fields.

A high potential in saving production costs is seen in the identification and measurement of internal wood criteria in roundwood, in combination with the identification of the external quality (e.g. taper, sweep) and the measurement of dimension. The potential will be achieved by a more sophisticated quality pre-sorting of the logs. The pre-sorting normally generates a higher added-value. Therefore, the information of the internal and external wood quality treat a log as translucent. This allows the highest added-value of a sawn product to be assigned to a log at the beginning of the production process. The pre-sorting of logs leads to homogeneous collectives of wood quality, which can be sawn in turn, depending on the whole wood quality of the logs. A higher yield of sawn products is possible, which causes lower production costs. Finally the input of raw material for the production of one sawn-wood unit can be decreased because of the higher yield. This allows the saving of raw material costs, which currently represents more than 50 % of the whole production costs.

The test objects were 411 spruce (*Picea abies*) and fir (*Abies alba*) logs (3 m to 6 m long), which represented the characteristic feature of the ring width of south Germany (1 mm to 9 mm). The distribution of the mid-diameter corresponds to the normally delivered dimensions (between 10 and 55 cm under-bark) to the sawmill.

The measurements of the logs were taken and analysed with the statistic software SAS (Version 8.1). Besides descriptive data analysis, for example, the number of separate ring measurements per log, the obtained rate of ring results of a test collective or the accuracy of the automated ring measurement, linear simple and multiple analysis of correlation and regression were calculated to analyse the potential influence of the criteria on the automated ring measurement. Furthermore, the accuracy of a round-wood pre-sorting based on the ring results were checked.

The results of the data analysis can be summarised as the following:

An automated ring measurement was ascertained for an average of 98 % of all logs irrespective of the time of the year. Any influence of the environment (e.g. temperature) on the ring measurement can be excluded because of the very similar rate of ring results for every test collective. This statement was confirmed by the basic data, which showed in all tests, an average number of maximum possible measurements per log of between 30 % and 32 %.

A repetition of ring measurements showed a very high correlation of the ring widths per log. The average standard deviations were $s = 0,10 \text{ mm}$ (test 2) or $s = 0,12 \text{ mm}$ (test 1) and demonstrate a very small deviation for every log in all runs. This means that a reproducible ring measurement is given independent of the number of measurement runs.

In all test the TOMOLOG determines ring widths between 2.4 mm and 8.30 mm. A correlation existed between the range of the manual and automated ring results. Beyond this, results showed an increase in the automated ring widths deviation with increasing manual results.

The correlation coefficient [r] for the relationship between the automated and manual ring widths showed values between $r = 0,3$ (test 2) and $r = 0,81$ (test 1). The narrowness of the relations very strongly depends on the range and the distribution of the manual ring results. Tight linear correlations were ascertained by a near Gauß distribution of the logs covering the whole characteristic feature of ring widths (1 to 8 mm). The position of the manual measurement on the logs had an influence on the degree of relationship between the automated and manual ring widths. The closer the manual measurements were done at the top end of the log the more tightly the linear connections were.

A round-wood pre-sorting in two collectives on the basis of the automated ring results showed a sorting correctness of between 55 % and 93 % for all logs, depending on the chosen sorting threshold (3 mm, 4 mm or 5 mm). 70 % to 89 % of all logs were correctly pre-sorted if the test collectives had a Gauß-distribution of all logs in order to the range of ring widths (test 1, 3a and 3b).

The ring measurements of the TOMOLOG were statistically significantly influenced by the “mid-“ and “top diameter”, “wood density” “moisture content”, “compression wood”, “eccentricity” and “physical length”. Between 38 % and 45 % of the deviation of the automated measurement values can be explained in the applied regression model by the variables “top diameter”, “wood density”, “moisture content” and “compression wood”. An influence of the compression wood was proven in one test (no. 1) only.

A linear relation was ascertained among the “mid-“ and “top diameter”, “wood density” “moisture content” and “compression wood” and the “difference between the automated and manually obtained ring results” (Δ = automated minus manual). These variables showed that in the used model of the linear multiple regression, 39% to 65 % of the deviation of the values of the ring difference can be explained.

The results of the examination showed that an automated identification and measurement of the ring width is given by the TOMOLOG under normal production conditions (220 m/min). The dependence of the automated ring results on the dimension can be solved technically. Altogether, the ascertained results of the TOMOLOG confirm the physical conformity with a natural law of the x-ray absorption.

The presented results will be used as the basis for further development on the wood density measurement. This makes a more precise automated ring width measurement possible. An exact measurement of the ring width is apt to identify and measure further internal wood features, e.g. knots, so that the added-value of the production process can be further optimised.

9 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Kennzahlen des Rundholzkollektivs im Versuch 1 (n = 19).....	23
Tabelle 2:	Anzahl [n] und Prozent [%] von Rundholzabschnitten je Standardlänge [m] in Versuch 1 (n = 19).....	24
Tabelle 3:	Kennzahlen des Rundholzkollektivs im Versuchs 2 (n = 157).....	25
Tabelle 4:	Anzahl [n] und Prozent [%] von Rundholzabschnitten je Standardlänge [m] im Versuch 2 (n = 157).....	25
Tabelle 5:	Kennzahlen des Rundholzkollektivs im Versuchs 3a (n = 234).....	27
Tabelle 6:	Anzahl [n] und Prozent [%] von Rundholzabschnitten je Standardlänge [m] im Versuch 3a (n = 234).....	28
Tabelle 7:	Kennzahlen des Rundholzkollektivs im Versuch 3b (n = 235).....	29
Tabelle 8:	Anzahl [n] und Prozent [%] von Rundholzabschnitten je Standardlänge [m] im Versuch 3b (n = 235).....	30
Tabelle 9:	Anzahl [n] tatsächlich durchgeführter und Prozent [%] potentiell möglicher Messungen in der Jahrringbreite je Rundholzabschnitt im Versuch 1.....	46
Tabelle 10:	Anzahl [n] tatsächlich durchgeführter Messungen in der Jahrringbreite entlang der Stammachse in den 16 Messsektionen beziehungsweise je Laufmeter [lfm] Rundholzabschnitt im Versuch 1.....	47
Tabelle 11:	Anzahl [n] Messsektionen je Rundholzabschnitt, für die keine Jahrringbreite entlang der Stammachse ermittelt werden konnte und Prozent [%] Rundholzabschnitte mit mindestens einer Messsektion ohne ein Messergebnis in der Jahrringbreite im Versuch 1.....	48
Tabelle 12:	Anzahl [n] und Prozent [%] tatsächlich durchgeführter Jahrringbreitenmessungen je Röntgenquelle und Messdurchlauf im Versuch 1 (n = 19 beziehungsweise in DL 7 n = 18).....	49
Tabelle 13:	Ergebnisse der Varianzanalyse zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit von maschinell ermittelten Jahrringbreiten je Rundholzabschnitt.....	50
Tabelle 14:	Manuell und maschinell ermittelte Jahrringbreiten je Messdurchlauf.....	52
Tabelle 15:	Anzahl [n] von Rundholzabschnitten je Jahrringbreitenklasse und Messdurchlauf im Versuch 1.....	54
Tabelle 16:	Ergebnisse einer Vorsortierung von Rundholzabschnitten auf Basis der maschinell ermittelten Jahrringbreite in Abhängigkeit des jeweils verwendeten Sortiergrenzwerts differenziert nach Messdurchläufen und Sortierkollektiven im Versuch 1 (n = 19 beziehungsweise in DL 7 n = 18).....	56

Tabelle 17:	Ergebnisse der linearen einfachen Korrelationsanalyse zwischen der maschinell ermittelten Jahrringbreite und den Variablen „manuell ermittelte Jahrringbreite“, „Mitten-“ und „Zopfdurchmesser“, „Holzdichte“, „Holzfeuchte“, „Druckholzanteil“, „Exzentrizität“, „Ovalität“ sowie „physikalische Länge“ im Versuch 1 (n = 19 beziehungsweise in DL 7 n = 18)	59
Tabelle 18:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression je Messdurchlauf im Versuch 1: maschinell ermittelte Jahrringbreite = f (manuell ermittelte Jahrringbreite [JBR man], Zopfdurchmesser [ZDM], Druckholz [DH]), multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (n = 19 beziehungsweise in DL 7 n = 18)	62
Tabelle 19:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression im Versuch 1: Durchschnittlich maschinell ermittelte Jahrringbreite = f (manuell ermittelte Jahrringbreite [JBR man], Zopfdurchmesser [ZDM], Druckholz [CW]); multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x]	63
Tabelle 20:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression je Messdurchlauf im Versuch 1: Maschinell ermittelte Jahrringbreite = f (Holzdichte [HD], Zopfdurchmesser [ZDM]), multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (n = 19 beziehungsweise in DL 7 n = 18)	63
Tabelle 21:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression im Versuch 1: Durchschnittlich maschinell ermittelte Jahrringbreite = f (Holzdichte [HD], Zopfdurchmesser [ZDM]), multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x]	64
Tabelle 22:	Ergebnisse der linearen einfachen Korrelationsanalyse zwischen den Kriterien „Mitten- und Zopfdurchmesser“, „Druckholzanteil“, „Holzdichte“, „Holzfeuchtigkeit“, „Exzentrizität“, „Ovalität“ und „physikalische Länge“ und der Messdifferenz zwischen der maschinell und der manuell ermittelten Jahrringbreite im Versuch 1	66
Tabelle 23:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression je Messdurchlauf im Versuch 1: Jahrringbreitendifferenz = f (Zopfdurchmesser [ZDM], Holzfeuchte [u], Druckholz [DH]); multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (n = 19 beziehungsweise in DL 7 n = 18)	68
Tabelle 24:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression im Versuch 1: Durchschnittliche Jahrringbreitendifferenz aller Messdurchläufe = f (Zopfdurchmesser [ZDM], Holzfeuchte [u], Druckholz [DH]); multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (n = 19)	69

Tabelle 25:	Anzahl [n] tatsächlich durchgeführter und Prozent [%] potentiell möglicher Messungen in der Jahrringbreite je Rundholzabschnitt im Versuch 2 (n = 157)	72
Tabelle 26:	Anzahl [n] tatsächlich durchgeführter Messungen in der Jahrringbreite entlang der Stammachse in den 16 Messektionen beziehungsweise je Laufmeter [lfm] Rundholzabschnitt im Versuch 2 (n = 157)	73
Tabelle 27:	Anzahl [n] Messektionen je Rundholzabschnitt, für die keine Jahrringbreite entlang der Stammachse ermittelt werden konnte und Prozent [%] Rundholzabschnitte mit mindestens einer Messektion ohne ein Messergebnis in der Jahrringbreite im Versuch 2	73
Tabelle 28:	Anzahl [n] und Prozent [%] tatsächlich durchgeführter Jahrringbreitenmessungen je Messdurchlauf und Röntgenquelle im Versuch 2 (n = 157)	74
Tabelle 29:	Ergebnisse der Varianzanalyse zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit von maschinell ermittelten Jahrringbreiten je Rundholzabschnitt im Versuch 2 (n = 157)	75
Tabelle 30:	Manuell und maschinell ermittelte Jahrringbreiten je Messdurchlauf im Versuch 2	77
Tabelle 31:	Anzahl [n] und Prozent [%] von Rundholzabschnitten je Jahrringbreitenklasse im Versuch 2 (n = 157)	80
Tabelle 32:	Ergebnisse einer Vorsortierung von Rundholzabschnitten auf Basis der maschinell ermittelten Jahrringbreite in Abhängigkeit des jeweils verwendeten Sortiergrenzwerts differenziert nach Messdurchläufen und Sortierkollektiven im Versuch 2 (n = 157)	81
Tabelle 33:	Ergebnisse der linearen einfachen Korrelationsanalyse zwischen der maschinell ermittelten Jahrringbreite und den Variablen „manuell ermittelte Jahrringbreite“, „Mitten- und Zopfdurchmesser“, „Holzdichte“, „Holzfeuchte“, „Druckholz“, „Exzentrizität“, „Ovalität“ und „physikalische Länge“ im Versuch 2	83
Tabelle 34:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression je Messdurchlauf im Versuch 2: Maschinell ermittelte Jahrringbreite = f (Zopfdurchmesser [ZDM], manuell ermittelte Jahrringbreite [Jbr man], Holzfeuchte [U] und Holzdichte [HD]); multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (n = 157)	86
Tabelle 35:	Ergebnisse der linearen einfachen Korrelationsanalyse zwischen den Kriterien „maschinell ermittelter Mitten- und Zopfdurchmesser“, „Holzdichte“, „Holzfeuchte“, „Druckholz“, „Exzentrizität“, „Ovalität“ sowie „physikalische Länge“ und der Messdifferenz zwischen der maschinell und manuell ermittelten Jahrringbreite im Versuch 2	87

Tabelle 36:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression je Messdurchlauf im Versuch 2: Jahrringbreitendifferenz = f (Zopfdurchmesser [ZDM]; Holzfeuchte [U]; physikalische Länge [p L] Holzdicke [HD]); multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (Versuch 2, n = 157)	91
Tabelle 37:	Anzahl [n] tatsächlich durchgeführter und Prozent [%] potentiell möglicher Jahrringbreitenmessungen je Rundholzabschnitt im Versuch 3a	94
Tabelle 38:	Anzahl [n] tatsächlich durchgeführter Messungen in der Jahrringbreite entlang der Stammachse in den Messsektionen beziehungsweise je Laufmeter [m] Rundholzabschnitt im Versuch 3a (n = 234 beziehungsweise n = 233).....	95
Tabelle 39:	Anzahl [n] Messsektionen je Rundholzabschnitt, für die keine Jahrringbreite entlang der Stammachse ermittelt werden konnte und Prozent [%] Rundholzabschnitte mit mindestens einer Messsektion ohne ein Messergebnis in der Jahrringbreite im Versuch 3a	95
Tabelle 40:	Anzahl [n] und Prozent [%] tatsächlich durchgeführter Jahrringbreitenmessungen je Röntgenquelle im Versuch 3a (n = 233 (Kreis) beziehungsweise n = 234 (Ellipse)).....	96
Tabelle 41:	Manuell und maschinell ermittelte Jahrringbreiten im Versuch 3a	97
Tabelle 42:	Korrelationskoeffizienten [r] und das jeweilige Signifikanzniveau [α] zwischen den jeweils manuell und maschinell ermittelten Jahrringbreiten im Versuch 3a.....	98
Tabelle 43:	Anzahl [n] und Prozent [%] von Rundholzabschnitten je Jahrringbreitenklasse (z. B. Klasse 1 = 1,00mm bis 1,99 mm) im Versuch 3a	100
Tabelle 44:	Ergebnisse einer Vorsortierung von Rundholzabschnitten auf Basis der maschinell ermittelten Jahrringbreite in Abhängigkeit des jeweils verwendeten Sortiergrenzwerts differenziert nach Messalgorithmus und Sortierkollektiven im Versuch 3a (n = 234 beziehungsweise n = 233).....	102
Tabelle 45:	Ergebnisse der linearen einfachen Korrelationsanalyse zwischen der „maschinell ermittelten Jahrringbreite“ und den Variablen „Mitten- und Zopfdurchmesser“, „Holzdichte“, „Holzfeuchte“, „Druckholz“, „Exzentrizität“, „Ovalität“, „physikalische Länge“ und „Abholzigkeit“ im Versuch 3a.....	105

Tabelle 46:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression je Messalgorithmus im Versuch 3a: Maschinell ermittelte Jahrringbreite = f (manuell ermittelte Jahrringbreite [JBR man], Zopfdurchmesser [ZDM], Holzfeuchte [U] und Holzdicke [HD]); multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (n = 234 beziehungsweise n = 233)	109
Tabelle 47:	Ergebnisse der linearen einfachen Korrelationsanalyse zwischen den Kriterien „Mitten-“ und „Zopfdurchmesser“, „Holzdicke“, „Holzfeuchte“, „Druckholzanteil“, „Ovalität“, „Exzentrizität“, „physikalische Länge“ sowie „Abholzigkeit“ und der Messdifferenz zwischen der maschinell und manuell ermittelten Jahrringbreite im Versuch 3a	110
Tabelle 48:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression je Messalgorithmus im Versuch 3a: Jahrringbreitendifferenz = f (Holzdicke [HD]; Zopfdurchmesser [ZDM]; Holzfeuchte [U]); multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (n = 234 beziehungsweise n = 233)	114
Tabelle 49:	Anzahl [n] tatsächlich durchgeführter und Prozent [%] potentiell möglicher Messungen in der Jahrringbreite je Rundholzabschnitt im Versuch 3b	117
Tabelle 50:	Anzahl [n] tatsächlich durchgeführter Messungen in der Jahrringbreite entlang der Stammachse in den 16 Messsektionen beziehungsweise je Laufmeter [lfm] Rundholzabschnitt im Versuch 3b	118
Tabelle 51:	Anzahl [n] Messsektionen je Rundholzabschnitt, für die keine Jahrringbreite entlang der Stammachse ermittelte werden konnte und Prozent [%] Rundholzabschnitte mit mindestens einer Messsektion ohne ein Messergebnis in der Jahrringbreite in Versuch 3b	119
Tabelle 52:	Anzahl [n] und Prozent [%] tatsächlich durchgeführter Messungen je Röntgenquelle im Versuch 3b (n = 235 (Ellipse) beziehungsweise n = 236 (Kreis))	119
Tabelle 53:	Manuell und maschinell ermittelte Jahrringbreiten im Versuch 3b	120
Tabelle 54:	Korrelationskoeffizienten [r] und das jeweilige Signifikanzniveau [α] zwischen den jeweils manuell und maschinell ermittelten Jahrringbreiten im Versuch 3b	121
Tabelle 55:	Anzahl [n] und Prozent [%] von Rundholzabschnitten je Jahrringbreitenklasse (z. B. Klasse 1 = 1,00 mm bis 1,99 mm) im Versuch 3b	123

Tabelle 56:	Ergebnisse einer Vorsortierung von Rundholzabschnitten auf Basis der maschinell ermittelten Jahrringbreiten in Abhängigkeit des jeweils verwendeten Sortiergrenzwerts differenziert nach Messalgorithmen und Sortierkollektiven im Versuch 3b (n = 235 beziehungsweise n = 236).....	125
Tabelle 57:	Ergebnisse der linearen einfachen Korrelationsanalysen zwischen der „maschinell ermittelte Jahrringbreite und den Variablen „manuell ermittelte Jahrringbreite“, „Mitten-,“ und „Zopfdurchmesser“, „Holzdichte“, „Holzfeuchte“, „Druckholzanteil“, „Exzentrizität“, „Ovalität“, „physikalische Länge“ und „Abholzigkeit“ im Versuch 3b	127
Tabelle 58:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression je Messalgorithmus im Versuch 3b: Maschinell ermittelte Jahrringbreite = f (manuell ermittelte Jahrringbreite [JBR man], Zopfdurchmesser [ZDM], Holzfeuchte [U] und Holzdicke [HD]); multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (Versuch 3b; n = 235 (Ellipse) beziehungsweise n = 236 (Kreis)).	131
Tabelle 59:	Ergebnisse der linearen einfachen Korrelationsanalyse zwischen den Kriterien „Mitten-,“ und „Zopfdurchmesser“, „Holzdichte“, „Holzfeuchte“, „Druckholz“, „Ovalität“, „Exzentrizität“, „physikalische Länge“ sowie „Abholzigkeit“ und der „Messdifferenz zwischen der maschinell und manuell ermittelten Jahrringbreite“ im Versuch 3b.....	132
Tabelle 60:	Kenngrößen der linearen multiplen Regression je Messalgorithmus im Versuch 3b: Jahrringbreitendifferenz = f (Holzdichte [HD]; Zopfdurchmesser [ZDM]; Holzfeuchte [U]; Abholzigkeit [ABH]); multipler Korrelationskoeffizient [r], Bestimmtheitsmaß [R ²] und Erklärungsanteile [R ² _x] (n = 235 beziehungsweise n = 236)	135

10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau einer Röntgenquelle (aus BROCKHAUS 2002).....	6
Abbildung 2:	Veränderung in der Strahlungszusammensetzung und –intensität bei Veränderung der Spannung (aus GLOCKER 1985).....	7
Abbildung 3:	Messrahmen zur diskreten Tomographie mit fester Röntgenquelle und Detektor (aus MICROTEC 2003).....	7
Abbildung 4:	Konstruktion eines Computertomographen mit rotierender Röntgenquelle und fest installierten Detektoren (aus GUPTA et al. 1998).....	7
Abbildung 5:	Mögliche Varianten in der Anordnung von Detektoren und Röntgenquelle in einem Computer-Tomographen (aus GUPTA et al. 1998).....	8
Abbildung 6:	Reisegepäck-Röntgenscanneranlage, wie sie auf Flughäfen zum Einsatz kommen (aus HEIMANN 2004).....	12
Abbildung 7:	Röntgenbild eines durchleuchteten Reisekoffers (aus HEIMANN 2004).....	12
Abbildung 8:	Ergebnis einer LKW-Durchleuchtung mittels Röntgenstrahlen (aus HEIMANN 2004).....	12
Abbildung 9:	Original-Tomogramm einer gesunden Fichte. Splint- und Kernholz zeichnen sich durch deutlich verschiedene Absorption aus und sind genau gegeneinander abzugrenzen, was die quantitative Bestimmung der Flächen ermöglicht (aus HABERMEHL 1996).....	15
Abbildung 10:	Tomogramm einer rotfaulen Fichte mit nur noch schmalen Splint; durch Fäule verschieden stark zersetztes Kernholz mit Holzräumen im Inneren des Stamms (aus HABERMEHL 1996).....	15
Abbildung 11:	Astquirle im Röntgenbild eines Fichtenrundholzabschnitts (MICROTEC 2004).....	17
Abbildung 12:	Vergleich eines realen Bretts mit einem virtuell aus einer CT-Aufnahme rekonstruierten (InnovativVision 2004).....	20
Abbildung 13:	Durch Röntgenstrahlen ermittelte Qualitätsmerkmale eines Schnittholzprodukts.....	20
Abbildung 14:	Prozentuale Verteilung der Rundholzabschnitte auf die HKS-Stärkeklassen im Versuch 1 (n = 19).....	24
Abbildung 15:	Prozentuale Verteilung der Rundholzabschnitte auf die HKS-Stärkeklassen im Versuch 2 (n = 157).....	26
Abbildung 16:	Prozentuale Verteilung der Rundholzabschnitte auf die HKS-Stärkeklassen im Versuch 3a (n = 234).....	27
Abbildung 17:	Eine in den äußeren rund 5 cm gefrorene Stammscheibe (Rundholzabschnitt Nr. 200).....	28

Abbildung 18:	Prozentuale Verteilung der Rundholzabschnitte auf die HKS-Stärkeklassen im Versuchs 3b (n = 235).....	30
Abbildung 19:	Charakteristischer Aufbau von Jahrringen am Beispiel der Fichte	31
Abbildung 20:	Rahmenkonstruktion des Röntgenmessrahmens TOMOLOG	34
Abbildung 21:	Röntgenbild eines Fichtenrundholzabschnitts.....	34
Abbildung 22:	Lage der Messebenen und Messsektionen zur Bestimmung der Jahrringbreite bei einer geschliffenen Stammfußscheibe	38
Abbildung 23:	Lage des „Kuchenstücks“ in der Messebene 1 zur Bestimmung der Holzdicke und Holzfeuchte.....	41
Abbildung 24:	Zusammenhang zwischen den jeweils maschinell ermittelten Jahrringbreiten der Messdurchläufe 1 und 2 im Versuch 1 (n = 19)	50
Abbildung 25:	Zusammenhang zwischen den manuell und den maschinell ermittelten Jahrringbreiten [mm] des Messdurchlaufs Nr. 7 im Versuch 1 (n = 18).....	53
Abbildung 26:	Verteilung der manuell und der maschinell ermittelten Jahrringbreitenklassen im Messdurchlauf Nr. 5 (n = 19) (Jahrringbreitenklasse 1 = Jahrringbreite: 1,00 mm bis 1,99 mm)	54
Abbildung 27:	Prozent [%] richtig vorsortierter Rundholzabschnitte in Abhängigkeit des gewählten Sortiergrenzwertes [mm] im siebten Messdurchlauf des ersten Versuchs (n = 18).....	57
Abbildung 28:	Zusammenhang zwischen der Holzdicke [g/cm ³] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im fünften Messdurchlauf des Versuchs 1 (n = 19).....	60
Abbildung 29:	Zusammenhang zwischen dem manuell ermittelten Zopfdurchmesser [cm o.R.] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] des Versuchs 1 (n = 19).....	60
Abbildung 30:	Zusammenhang zwischen dem manuell ermittelten Zopfdurchmesser [cm o.R.] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im achten Messdurchlauf des Versuchs 1 (n = 19).....	61
Abbildung 31:	Zusammenhang zwischen dem manuell ermittelten Zopfdurchmesser [cm o.R.] und der Jahrringbreitendifferenz [mm] im achten Messdurchlauf des Versuchs 1 (n = 19)	65
Abbildung 32:	Zusammenhang zwischen dem Druckholzanteil [%] und der Jahrringbreitendifferenz [mm] im vierten Messdurchlauf des Versuchs 1 (n = 19).....	67
Abbildung 33:	Zusammenhang zwischen den jeweils maschinell ermittelten Jahrringbreiten [mm] je Rundholzabschnitt in den beiden Messdurchläufe des Versuchs 2 (n = 157)	75

Abbildung 34:	Zusammenhang zwischen der manuell und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im zweiten Messdurchlauf des Versuchs 2 (n = 157).....	78
Abbildung 35:	Zusammenhang zwischen den manuell und maschinell ermittelten Jahrringbreiten im zweiten Messdurchlauf bei einem Rundholzkollektiv mit manuell ermittelten Jahrringbreiten > 2,4mm (n = 67).....	78
Abbildung 36:	Prozentuale Verteilung der maschinellen und manuellen Jahrringbreitenklassen im ersten Messdurchlauf des Versuchs 2 (n = 157).....	80
Abbildung 37:	Prozent [%] richtig vorsortierter Rundholzabschnitte in Abhängigkeit des gewählten Sortiergrenzwertes [mm] im ersten Messdurchlauf des Versuchs 2 (n = 157)	82
Abbildung 38:	Zusammenhang zwischen der Holzdicke [g/cm ³] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im zweiten Messdurchlauf des Versuchs 2 (n = 157).....	84
Abbildung 39:	Zusammenhang zwischen dem Zopfdurchmesser [cm o.R.] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im ersten Messdurchlauf des Versuchs 2 (n = 157).....	84
Abbildung 40:	Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte [%] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im ersten Messdurchlauf des Versuchs 2 (n = 157).....	85
Abbildung 41:	Zusammenhang zwischen dem Zopfdurchmesser [cm o.R.] und der Jahrringbreitendifferenz [mm] im zweiten Messdurchlauf des Versuchs 2 (n = 157).....	88
Abbildung 42:	Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte [%] und der Jahrringbreitendifferenz [mm] im ersten Messdurchlauf des Versuchs 2 (n = 157).....	89
Abbildung 43:	Zusammenhang zwischen der Holzdicke [g/cm ³] und der Jahrringbreitendifferenz im ersten Messdurchlauf des Versuchs 2 (n = 157)	90
Abbildung 44:	Zusammenhang zwischen der manuell an der Zopfscheibe bestimmten Jahrringbreite und der maschinell mit dem Ellipsenalgorithmus ermittelten Jahrringbreite im Versuch 3a (n = 234)	99
Abbildung 45:	Prozentuale [%] Verteilung der manuell und maschinell ermittelten Jahrringbreiten auf ihre jeweiligen Klassen im Versuch 3a (Ellipsenalgorithmus; n = 234).....	100
Abbildung 46:	Prozent [%] richtig vorsortierter Rundholzabschnitte in Abhängigkeit des gewählten Sortiergrenzwertes [mm] im Versuch 3a (Ellipsenalgorithmus, n = 234).....	102

Abbildung 47:	Vergleich der maschinell und der manuell ermittelten Jahrringbreite; grau hinterlegte Felder stellen Bereiche dar, in denen eine maschinelle Fehlsortierung bei einem Grenzwert von 4 mm vorgenommen wird (Versuch 3a; Ellipsenalgorithmus; n = 234)	103
Abbildung 48:	Zusammenhang zwischen dem Zopfdurchmesser [cm o.R.] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im Versuch 3a (Ellipsenalgorithmus, n = 234)	106
Abbildung 49:	Zusammenhang zwischen der Holzdicke [g/cm^3] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im Versuch 3a (Ellipsenalgorithmus; n = 234)	107
Abbildung 50:	Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte [%] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im Versuch 3a (Ellipsenalgorithmus; n = 234)	107
Abbildung 51:	Zusammenhang zwischen dem Zopfdurchmesser [cm o.R.] und der Messdifferenz zwischen der maschinell (Ellipsenalgorithmus) und manuell (Mittelwert) ermittelten Jahrringbreite [mm] im Versuch 3a (n = 234)	111
Abbildung 52:	Zusammenhang zwischen der Holzdicke [g/cm^3] und der Messdifferenz zwischen der maschinell (Ellipsenalgorithmus) und manuell (Mittelwert) ermittelten Jahrringbreite [mm] im Versuch 3a (n = 234)	111
Abbildung 53:	Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte [%] und der Messdifferenz zwischen der maschinell (Ellipsenalgorithmus) und manuell (Mittelwert) ermittelten Jahrringbreite [mm] im Versuch 3a (n = 234)	112
Abbildung 54:	Zusammenhang zwischen den manuell an der Zopfscheibe und den maschinell mit dem Ellipsenalgorithmus ermittelten Jahrringbreiten [mm] im Versuch 3b (n = 235)	122
Abbildung 55:	Prozentuale Verteilung der manuell und maschinell mit dem Ellipsenalgorithmus ermittelten Jahrringbreitenklassen im Versuch 3b (n = 235)	124
Abbildung 56:	Prozent [%] richtig vorsortierter Rundholzabschnitte in Abhängigkeit des gewählten Sortiergrenzwerts [mm] im Versuch 3b (Ellipsenalgorithmus, n = 235)	126
Abbildung 57:	Zusammenhang zwischen dem Zopfdurchmesser [cm o.R.] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im Versuch 3b (Ellipsenalgorithmus, n = 235)	128
Abbildung 58:	Zusammenhang zwischen der Holzdicke [g/cm^3] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im Versuch 3b (Ellipsenalgorithmus, n = 235)	129

Abbildung 59:	Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte [%] und der maschinell ermittelten Jahrringbreite [mm] im Versuch 3b (Ellipsenalgorithmus, n = 235).....	129
Abbildung 60:	Zusammenhang zwischen der Zopfdimension [cm o.R.] und der Differenz in der Jahrringbreite [mm] (Ellipsenalgorithmus; n = 235).....	133
Abbildung 61:	Zusammenhang zwischen der Holzdicke [g/cm ³] und der Differenz in der Jahrringbreite [mm] im Versuch 3b (Ellipsenalgorithmus; n = 235).....	133
Abbildung 62:	Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte [%] und der Differenz in der Jahrringbreite [mm] im Versuch 3b (Ellipsenalgorithmus; n = 235).....	134