BERICHTE
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

HEFT 98

CT-SPEC: Von der röntgengestützten Rundholzvermessung direkt zur Konstruktionsplanung

Thomas Fillbrandt, Uwe Uhlich, Gero Becker

Abschlussbericht Teilprojekt 1: Identifikation von Rundholz schwacher Dimension, Herleitung von Potenzialen, Überlegungen zur Supply-Chain für die angestrebte Rundholzverwendung

Franka Brüchert, Thomas Maschler, Christian Müller

Abschlussbericht Teilprojekt 2: Erkennung innerer Holzmerkmale von Kastanie, Eiche und Robinie mittels Computertomografie

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG
ABTEILUNG WALDNUTZUNG

ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG
PROFESSUR FÜR FORSTBENUTZUNG

2014

Bibliographische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.dbb.de abrufbar.

ISSN 1436-1566

Die Herausgeber
Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg und
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Umschlaggestaltung
Bernhard Kunkler Design, Freiburg

Druck
Eigenverlag der FVA, Freiburg

Bestellung an
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhaldestraße 4
79100 Freiburg
Telefon: 0761/4018-0, Fax: 0761/4018-333
E-Mail: fva-bw@forst.bwl.de
www.fva-bw.de

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

Gedruckt auf 100% chlorfrei gebleichtem Papier.

investition in
Ihre Zukunft!

Baden-Württemberg

gefördert durch den Cluster Forst-Holz
des Landes Baden-Württemberg

aus Mitteln des
Europäischen Fonds für regionale Entwicklung
(RWB-EFRE Baden-Württemberg)

RWB
EFRE

INHALTSVERZEICHNIS

1. TEILPROJEKT 1: IDENTIFIKATION VON RUNDHOLZ SCHWACHER DIMENSION, HERLEITUNG VON POTENZIALEN, ÜBERLEGUNGEN ZUR SUPPLY-CHAIN FÜR DIE ANGESTREBTE RUNDHOLZVERWENDUNG 1

1.1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE 1

1.2. BEREITSTELLUNG VON GEEIGNETEM AUSGANGSMATERIAL, ORGANISATION UND BEGLEITUNG DER LOGISTIK FÜR DAS VERSUCHSMATERIAL 1

1.3. ABSCHÄTZUNG DES REGIONALEN, LANGFRISTIG NUTZBAREN POTENZIALS AN GEEIGNETEN SORTIMENTEN 2
- 1.3.1. Methoden und verwendete Daten 2
- 1.3.2. Auswertung der Daten der Bundeswaldinventur II für Baden-Württemberg 3
- 1.3.3. Forstbetriebliche Inventuren des Betriebs Forst-BW 3
- 1.3.4. Befragung von Kreisforstämtern 3

1.4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION 4
- 1.4.1. Regionale Auswertung der Bundeswaldinventur II 4
- 1.4.2. Auswertung der Daten der forstbetrieblichen Inventuren (Forsteinrichtungsdaten) 5
- 1.4.3. Ergebnisse der Befragung von Kreisforstämtern 9

1.5. SCHLUSSFOLGERUNGEN 11

1.6. LITERATUR 12

2. TEILPROJEKT 2: ERKENNUNG INNERER HOLZMERKMALE VON KASTANIE, EICHE UND ROBINIE MITTELS COMPUTERTOMOGRAFIE 13

2.1. EINFÜHRUNG 13
- 2.1.1. Allgemeine Charakteristik ringporigen Holzes 13
- 2.1.2. Computertomographie und Holzforschung 15
- 2.1.3. Erkennung von Rinde, Splint- und Kernholz 17
- 2.1.4. Zielsetzung 18

2.2. MATERIAL UND METHODEN 18
- 2.2.1. Material 18
- 2.2.2. Referenzmessung Rindenstärke 18
- 2.2.3. Erkennungsverfahren innerer Holzmerkmale in CT-SPEC 22
- 2.2.4. Auswertung des Stammmaterials 22

2.3. ERGEBNISSE 23
- 2.3.1. Erkennungsverfahren 23
- 2.3.2. Auswertung des Stammmaterials 39

2.4. VALIDIERUNG DER HOLZDICHTE-BESTIMMUNG DURCH REFERENZMESSUNGEN 54
- 2.4.1. Vorgehensweise 54
- 2.4.2. Ergebnisse 54

2.5. DISKUSSION 66
2.5.1. Referenzmessung 67
2.5.2. Erkennungsverfahren 68
2.5.3. Optimierung 69
2.5.4. Schlussfolgerungen 70

2.6. LITERATUR 71

ABBILDUNGSVERZEICHNIS 73

TABELLENVERZEICHNIS 75

1. TEILPROJEKT 1: IDENTIFIKATION VON RUNDHOLZ SCHWACHER DIMENSION, HERLEITUNG VON POTENZIALEN, ÜBERLEGUNGEN ZUR SUPPLY-CHAIN FÜR DIE ANGESTREBTE RUNDHOLZVERWENDUNG

1.1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE

Während starkes und qualitativ gutes Stammholz der Baumarten Eiche, Robinie und Kastanie als Sägeholz oder sogar als Furnierholz auf eine hohe Nachfrage trifft und entsprechend hohe Verkaufserlöse erzielt, gibt es für die schwächeren (syn. dünneren) Sortimente dieser Baumarten, die im Zuge von Pflegemaßnahmen im Bestand (Durchforstungen) regelmäßig anfallen, nur wenige stoffliche Verwendungsmöglichkeiten. Die schwachen Stammholzsortimente dieser Baumarten werden aufgrund ihrer hohen Anteile an Gerbstoffen im Holz weder von der Papier- und Zellstoffindustrie noch von der Holzwerkstoffindustrie geschätzt bzw. nur ausnahmsweise in sehr geringen Mengen gekauft. Ebenfalls geringe Mengen sehr schwacher Sortimente finden im Spielplatzbau und als Zaun- oder Rebpfähle Verwendung. Die betreffenden Sortimente werden aktuell vor allem energetisch in Form von Scheitholz in Privathaushalten verwendet.
Ein Auslöser für die Projektidee für CT-SPEC war die unbefriedigende Erlössituation bei schwächeren Stammholz-Sortimenten der genannten Baumarten, für das bislang, entsprechend der überwiegenden Verwendung, meist nur Brennholzpreise erzielt werden können. Diese relativ niedrigen Preise decken in der Regel nicht die Gesamtkosten für die Durchforstungen, was dazu führt, dass waldbaulich und aus Stabilitätsgründen notwendige Pflegemaßnahmen oft unterlassen werden. Der im Projekt untersuchte mögliche Einsatz dieser Sortimente für konstruktive Zwecke dagegen verspricht eine stärkere Nachfrage nach diesen speziellen Sortimenten und eine höherwertige Verwendung des Holzes, womit in der Regel höhere Verkaufspreise verbunden sind.
Aufgabe der Universität Freiburg bzw. des ehemaligen Instituts für Forstbenutzung (seit 1.1.2013: Professur für Forstbenutzung) bei diesem Projekt war die Identifizierung, Suche und Bereitstellung von geeignetem Untersuchungsmaterial, die logistische Begleitung des gesamten Projekts sowie eine Abschätzung des regional langfristig nutzbaren Potenzials an geeigneten Sortimenten dieser Baumarten für eine gesicherte Versorgung von Betrieben, die diese Sortimente für eventuelle konstruktive Zwecke einzusetzen gedenken.

1.2. BEREITSTELLUNG VON GEEIGNETEM AUSGANGS-MATERIAL, ORGANISATION UND BEGLEITUNG DER LOGISTIK FÜR DAS VERSUCHS-MATERIAL

Das Projekt CT-SPEC untersucht neue, höherwertige stoffliche Verwendungs- und damit Absatzmöglichkeiten von schwächerem Stammholz der Baumarten Eiche, Robinie und Kastanie. Es wird untersucht, ob Stämme dieser Stärkeklassen für konstruktive Zwecke geeignet sind. Als „schwächeres“ Stammholz wird im Projekt Stammholz bezeichnet, welches einen Mittendurchmesser ohne Rinde (gemessen bei halber Stammlänge) von rund 15-25 cm hat. Diese Mittendurchmesser wurden vom Projektpartner KIT nach Belastungstests in einem vorangehenden Projekt als geeignet angesehen. Solche Stämme werden bei der forstlichen Verkaufssortierung gemäß der neuen „Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland“ (RVR) als Stämme der Stärkeklassen D 1b (Mittendurchmesser 15,0-19,9 cm) bzw. D 2a (Mittendurchmesser 20,0-24,9 cm) bezeichnet.
Die Suche nach geeignetem Untersuchungsmaterial in Baden-Württemberg erstreckte sich auf das gesamte Oberrheintal und die Schwarzwald-Vorbergzone zwischen Lörrach im Süden und Karlsruhe im Norden. Gemäß der natürlichen Standortansprüche der drei Baumarten ist die Kastanie eher an warmen Hängen in der Vorbergzone zu finden, während Eiche und Robinie vor allem im trocken-warmen Rheintal, oberhalb der zeitweise überfluteten Weichholzaue vorkommen. Das Material sollte aus Kostengründen im Zuge einer regulären Durchforstung sowie wegen möglichst geringer Transportkosten nahe beim ersten

Untersuchungsort (FVA Freiburg) anfallen. Mit Hilfe der angefragten Forstbezirks- und Revierleiter konnte schließlich in den benachbarten Landkreisen Emmendingen (Robinie, Eiche) und Ortenaukreis (Kastanie) geeignetes Untersuchungsmaterial gefunden werden. Die zu entnehmenden und anschließend zu untersuchenden Stämme wurden von den Projektpartnern Karlsruher Institut für Technologie und Universität Freiburg sowie vom Werkvertragsnehmer Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg gemeinsam im Wald ausgesucht.
Das ursprüngliche, nach der Fällung liegende Untersuchungsmaterial (vor dem Einschnitt in Abschnitte) ist wie folgt charakterisiert (angegeben sind jeweils Durchschnittswerte):

Tab. 1: Kennwerte des bereitgestellten Untersuchungsmaterials

Baumart	Stückzahl (N)	Ø Stammlänge (m)	Ø Mittendurchmesser (cm ohne Rinde)	Ø Stammvolumen (Efm)
Eiche	23	10,8	21,4	0,39
Robinie	16	11,5	20,1	0,38
Kastanie	29	9,85	22,9	0,42

Die dazugehörigen Brusthöhendurchmesser (gemessen am noch stehenden Baum) lagen jeweils im Bereich von rund 18-30 cm mit Rinde (Kastanie bis max. 34 cm mit Rinde).

1.3. ABSCHÄTZUNG DES REGIONALEN, LANGFRISTIG NUTZBAREN POTENZIALS AN GEEIGNETEN SORTIMENTEN

1.3.1. Methoden und verwendete Daten

Diese Abschätzung kann grundsätzlich mit mehreren Methoden erfolgen. Eine theoretisch mögliche und häufig angewendete Methode ist eine spezielle, auf einen bestimmten Zweck ausgerichtete, einmalige Datenerhebung. Diese Methode ist vor allem für Fragestellungen auf Kleinflächen von Interesse. Im vorliegenden Fall von gewünschten Aussagen über eine ganze Region oder über ein ganzes Bundesland wurde diese Methode aus Kostengründen nicht angewendet. In allen Fällen wurde daher auf bereits vorhandene Daten oder auf bereits vorhandenes Fachwissen zurückgegriffen. Folgende Quellen wurden verwendet:

- Daten der Bundeswaldinventur II für Baden-Württemberg
- Forstbetriebliche Inventurdaten der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg
- Befragung von Kreisforstämtern

Obwohl es sich bei der Abschätzung von regionalen Holzpotenzialen um Prognosen für weit in die Zukunft reichende Zeiträume handelt, können in der Forstwirtschaft bestehende Inventuren für diesen Zweck herangezogen werden. Im Wald kann im Gegensatz zu vielen anderen Produktionsbetrieben von einem aktuellen Zustand (Baumarten, Anzahl, Durchmesser und Höhe von Bäumen) mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen zukünftigen Zustand geschlossen werden. Grund ist das über Jahrzehnte hinweg relativ zuverlässig vorhersagbare Wachstumsverhalten von Einzelbäumen und Kollektiven aus bestimmten Baumarten (Waldbestände). Ermöglicht wird diese Vorhersage durch forstliche Wachstumsmodelle, die über viele Jahrzehnte aufgestellt und weiterentwickelt wurden.
Zu diesen bestehenden Inventuren zählen einerseits regelmäßig wiederholte Großrauminventuren wie die Bundeswaldinventur, andererseits kleinräumige Inventuren wie Betriebsinventuren, die z.B. für Zwecke der ebenfalls regelmäßig wiederholten forstlichen Planung (Forsteinrichtung) durchgeführt werden.

1.3.2. Auswertung der Daten der Bundeswald-inventur II für Baden-Württemberg

Für die Abschätzung der regionalen Holzpotenziale im Projekt CT-SPEC wurde zunächst die Eignung der Bundeswaldinventur geprüft. Die Bundeswaldinventur besitzt den großen Vorteil, dass die Inventur auch im Privatwald stattfindet, über den die forstbetrieblichen Inventurdaten der staatlichen Landesforstverwaltung nur sehr wenig Auskunft geben. In Baden-Württemberg besteht der weitere Vorteil, dass das bundesweite Stichprobennetz (Raster 4 x 4 km) für spezielle Auswertungen auf Landesebene auf die vierfache Stichprobenanzahl verdichtet wurde (Raster 2 x 2 km). Es zeigte sich rasch, dass die gegebene Stichprobendichte in Baden-Württemberg für häufig vorkommende Baumarten wie Buche und Fichte kleinräumige Aussagen nach Eigentumsarten sowie nach Durchmesser- oder Altersklassen mit einem akzeptablen, d.h. geringen Stichprobenfehler ermöglicht. Für relativ seltene Baumarten wie Robinie und Kastanie dagegen ist trotz der Verdichtung der Stichprobenfehler so hoch, dass keine zuverlässigen Aussagen möglich sind (FVA 2005, S. 4). Für seltene Baumarten sind zuverlässige Aussagen nur dann möglich, wenn nur regionale Einheiten bzw. hier die 7 forstlichen Wuchsgebiet in Baden-Württemberg und nur der Gesamtvorrat nach Eigentumsarten betrachtet wird. Eine entsprechende Auswertung für die Kastanie wurde von der Abteilung Biometrie der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt erstellt.

1.3.3. Forstbetriebliche Inventuren des Betriebs Forst-BW

Daten aus forstbetrieblichen Inventuren der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (Forsteinrichtungsdaten, FE-Daten) liegen über den gesamten öffentlichen Wald Baden-Württembergs und über geringe Teile des Privatwaldes in Baden-Württemberg vor. Die Daten werden regelmäßig (ca. alle 10-12 Jahre) aktualisiert und erlauben anschließend Aussagen über den stehenden Vorrat (Vfm) und die Flächen (ha) von einzelnen Baumarten zu einem bestimmten, in der nahen Vergangenheit liegenden Zeitpunkt. Ohne Annahmen über das zukünftige Wachstum (Wachstumsmodelle) sind auch anhand der Forsteinrichtungsdaten keine Aussagen über zukünftige Zustände möglich.
Ein Nachteil dieser Inventurdaten ist, dass der private Waldbesitz stark unterrepräsentiert ist. Der sogenannte Kleinprivatwald ist nicht zur periodischen Forsteinrichtung verpflichtet; dementsprechend liegen hierzu kaum Daten vor. Der größere Privatwald >100 ha ist zwar zur Aufstellung von periodischen Betriebsplänen bzw. zur Forsteinrichtung verpflichtet, die Daten werden im Regelfall jedoch nicht in die Datenbanken der Zentralen EDV-Sachbearbeitung der Landesforstverwaltung übernommen.
Für die Untersuchungen im Projekt CT-SPEC erstellte die Zentrale EDV-Sachbearbeitung der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (ZS-LFV) mehrere Datenbankabfragen zu den Baumarten Eiche (alle Eichenarten ohne Roteiche), Edelkastanie (syn.: Esskastanie) und Robinie. Die erhaltenen Daten zu den Vorräten und zu den Flächen sind unterteilt nach Landkreisen, Eigentumsarten, Baumarten und 20-jährigen Altersklassen.

1.3.4. Befragung von Kreisforstämtern

Eine weitere, ebenfalls häufig angewendete Methode im Forstbereich ist die einmalige (oder wiederholte) Befragung von Behörden, Institutionen, Firmen oder Personen, die in einem Zusammenhang mit dem Untersuchungsgegenstand stehen. Diese Methode wurde in einer Arbeit (GLEISSNER 2012) für das Projekt CT-SPEC angewendet. In der Arbeit wurden 46 baden-württembergische Kreisforstämter und zusätzlich 2 Forstämter im Regierungsbezirk Rheinhessen-Pfalz und die 2 Bundesforstämter Heuberg und Rhein-Mosel per E-Mail angeschrieben. Für die Befragung wurde ein Online-Fragebogen entwickelt. Gefragt wurde nach Schätzwerten für die zukünftigen Bereitstellungsmöglichkeiten für die betreffenden Baumarten und Sortimente im gesamten von der Forstbehörde bewirtschafteten oder betreuten Wald. Als Betrachtungs- oder Prognosezeitraum wurde 30 Jahre gewählt, wobei Angaben für erwartete Zustände in 10, 20 und 30 Jahren abgefragt wurden.
Die Wahl dieser Behörden (Zielgruppe) hat den Vorteil, dass alle Mitglieder der Zielgruppe bekannt sind und relativ einfach per E-Mail oder Brief erreicht werden können. Die Behörden decken aufgrund ihrer Funktion und räumlichen Zuständigkeit zum einen die gesamte Waldfläche ab und haben zum anderen einen

– im Verhältnis zu einzelnen Forstbetrieben – sehr guten Überblick über die Waldbestände und über die Waldbewirtschaftung im jeweiligen Zuständigkeitsgebiet.
Nachteilig ist, dass die Forstbehörden in der Regel zwar gut Bescheid wissen über den Landeswald und über den Kommunalwald, jedoch bei weitem keine vollständigen Kenntnisse über Baumarten und Vorräte im privaten Waldbesitz haben, der in Baden-Württemberg im Durchschnitt rund 36 % der Waldfläche einnimmt und in einzelnen Landkreisen (z.B. Ortenaukreis) fast die Hälfte des gesamten Waldes ausmacht. Eine Befragung der rund ¼ Million privater Waldbesitzer in Baden-Württemberg wurde jedoch angesichts des finanziellen Rahmens des Projektes ausgeschlossen.
Ein weiterer Nachteil ist die Freiwilligkeit der Teilnahme an einer solchen Befragung. Von den 46 in Baden-Württemberg angeschriebenen Forstbehörden antworteten 17 (Rücklaufquote 37 %). In 3 Landkreisen im östlichen Schwarzwald (Schwarzwald-Baar-Kreis, Enzkreis, Rottweil) fallen die abgefragten Sortimente nach Angaben der Kreisforstämter nur in vernachlässigbaren Mengen an, so dass diese Teilnehmer keine weiteren Angaben machten. Die weitere Auswertung basiert daher auf Antworten der 14 Kreise Alb-Donau-Kreis, Ortenaukreis, Main-Tauber-Kreis, Stadt Stuttgart, Landkreis Esslingen, Landkreis Biberach, Stadt Biberach, Landkreis Emmendingen, Landkreis Sigmaringen, Landkreis Heilbronn, Landkreis Lörrach, Landkreis Reutlingen, Landkreis Tübingen, Zollernalb-Kreis.

1.4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

1.4.1. Regionale Auswertung der Bundeswaldinventur II

Eine regionale Auswertung der Bundeswaldinventur II steht aktuell nur für die Edelkastanie zur Verfügung. Am Beispiel der Flächen und Vorräte dieser Baumart können jedoch die Effekte der Nicht-Berücksichtigung des Privatwaldes durch die forstbetrieblichen Inventuren der Landesforstverwaltung gezeigt werden (Tabelle 2).
Die folgende Tabelle zeigt lediglich die Gesamtflächen und -vorräte der Baumart Edelkastanie in allen Altersklassen an. Es wird deutlich, dass gerade bei der Edelkastanie große Flächen und Vorräte im Privatwald und insbesondere im Privatwald des Wuchsgebietes Schwarzwald vorhanden sind. So ist die Fläche im Privatwald in etwa doppelt so groß wie die Fläche im öffentlichen Wald, die Vorräte mehr als doppelt so hoch. Sofern man dieses Verhältnis 1:2 auch für die möglichen Nutzungsmengen unterstellt, so bedeutet dies, dass die für den öffentlichen Wald geschätzten Mengen nur ungefähr ein Drittel der potenziellen Nutzungsmengen aus allen Waldbesitzarten darstellen.

Die Angabe der Bundeswaldinventur II zur Fläche der Edelkastanie im Öffentlichen Wald (alle Altersklassen) in Baden-Württemberg mit 1.163 ha stimmt sehr gut mit den im folgenden Kapitel beschriebenen Forsteinrichtungsdaten überein, die eine Fläche von 1.149 ha (alle Altersklassen) nachweisen.
Der Durchschnittsvorrat im Privatwald liegt mit rund 360 Vfm/ha deutlich höher als der entsprechende Wert im öffentlichen Wald mit 267 Vfm/ha. Dies deutet darauf hin, dass die Bestände im Privatwald im Durchschnitt älter sind als die Bestände im öffentlichen Wald und/oder ein höheres theoretisches Nutzungspotenzial je Flächeneinheit besitzen.

Tab. 2: Flächen und Vorräte der Baumart Edelkastanie im öffentlichen und privaten Wald in Baden-Württemberg

Edelkastanie			
Wuchsgebiet	**Waldbesitzart**	**Fläche**	**Vorrat**
Oberrhein. Tiefland	Öffentlicher Wald	89 ha	22.508 Vfm
Odenwald	Öffentlicher Wald	440 ha	153.035 Vfm
Neckarland	Öffentlicher Wald	150 ha	24.842 Vfm
Schwarzwald	Öffentlicher Wald	484 ha	109.902 Vfm
	Summe Öffentl. Wald	**1.163 ha**	**310.287 Vfm**
Oberrhein. Tiefland	Privatwald	176 ha	31.276 Vfm
Odenwald	Privatwald	27 ha	22.556 Vfm
Neckarland	Privatwald	17 ha	0 Vfm
Schwarzwald	Privatwald	1.903 ha	708.091 Vfm
	Summe Privatwald	**2.123 ha**	**761.922 Vfm**

1.4.2. Auswertung der Daten der forstbetrieblichen Inventuren (Forsteinrichtungsdaten)

1.4.2.1 Verteilung der Baumartenflächen nach Altersklassen

Forsteinrichtungsdaten bilden den gesamten Wald ab, von jungen Beständen bis hin zu Altholzbeständen mit sehr starken bzw. dicken Stämmen. Entsprechend der Aufgabenstellung im Projekt, die die höherwertige Vermarktung *schwacher* Stammholsortimente anstrebt, können mittelstarke und starke Bestände außer Acht gelassen werden, da sie schon jetzt nicht mehr als Lieferanten der gesuchten Sortimente in Betracht kommen.

Die zur Verfügung stehenden Daten der Forsteinrichtung auf Landesebene machen keine Angaben zu Stammdurchmessern oder Brusthöhendurchmesser, sondern lediglich zum Alter. So sind die Baumartenflächen und -Vorräte nach 20-jährigen Altersklassen aufgelistet (Abb. 1 und 2). Während die Baumart Eiche vor allem in der I. Altersklasse und in den älteren Klassen >100 Jahre leicht überwiegt, zeigt sich, dass Robinie und Edelkastanie vor allem in jungen Altersklassen vertreten sind.

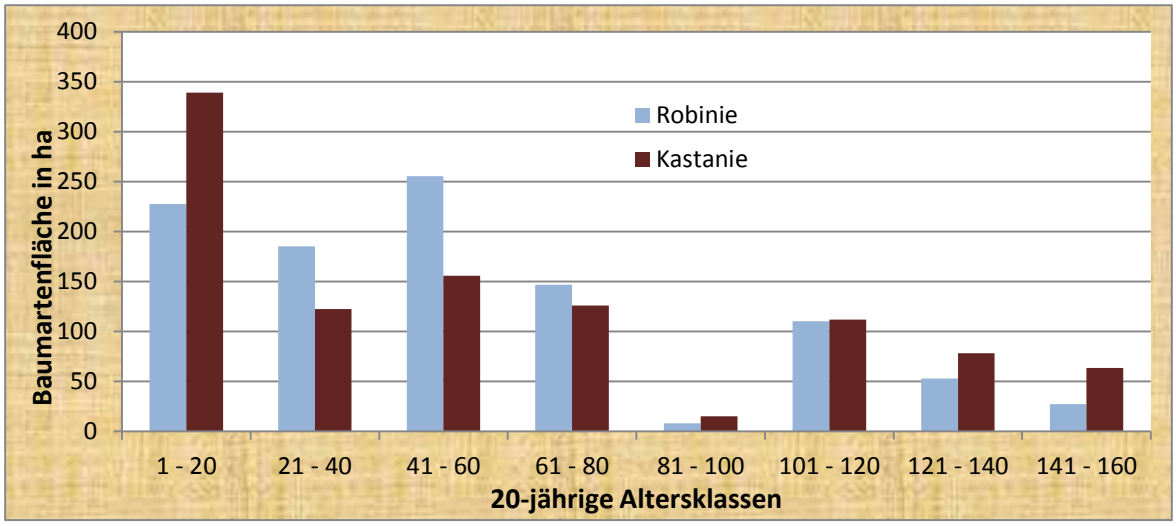

Abb. 1: Altersklassenflächen für Robinie und Edelkastanie gemäß Forsteinrichtung Baden-Württemberg, Stand 2012

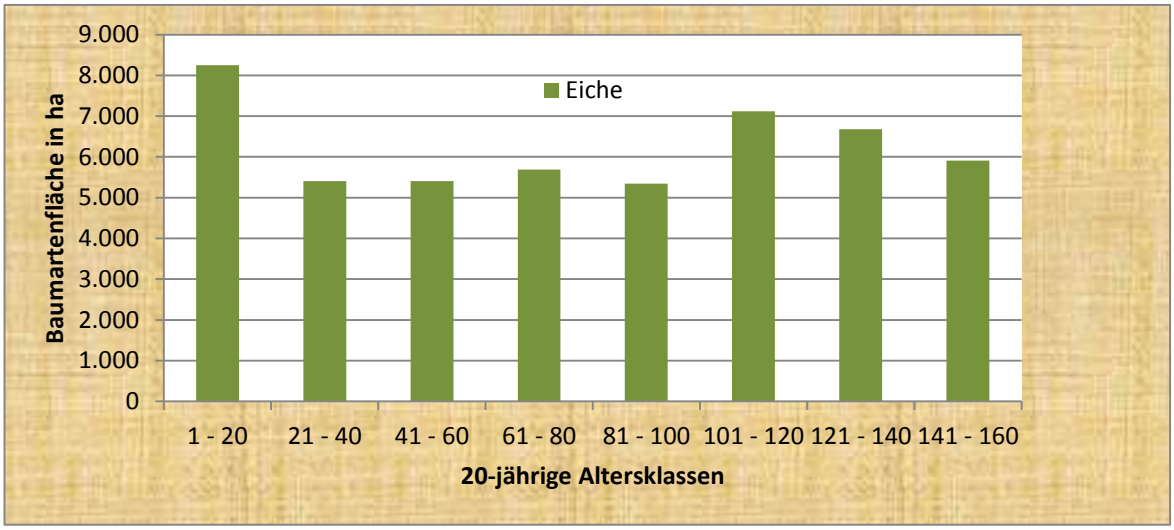

Abb. 2: Altersklassenflächen für Eiche gemäß Forsteinrichtung Baden-Württemberg, Stand 2012

Mit Hilfe der Ertragstafeln (LFV 1993) lässt sich abschätzen, in welchem Alter die Bäume einer bestimmten Baumart einen bestimmten durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser erreichen. Ertragstafeln existieren nur für die wirtschaftlich bedeutendsten Baumarten, wozu die Eiche[1] zählt. Die übrigen Baumarten werden gemäß den Hilfstabellen für die Forsteinrichtung (LFV 1993) wie folgt bonitiert: Esskastanie gemäß den Werten für Buche; Robinie gemäß den Werten für Birke.

Die Geschwindigkeit des Durchmesserwachstums (und v.a. des Höhenwachstums) ist vom Wuchsverhalten einer Baumart auf einem bestimmten Standort abhängig und wird auch als Leistungsfähigkeit einer Baumart bezeichnet. Die Zuwachsleistung einer Baumart wird in Baden-Württemberg als „durchschnittlicher jährlicher Gesamtzuwachs“ (dGz_y in $Vfm*ha^{-1}$) in einem bestimmten Alter y geschätzt (z.B. im Alter 100 Jahre: dGz_{100}). Sie kann je nach Standort (Boden, Nährstoffe, Klima, Wasserversorgung) stark variieren. Für die vorliegende Arbeit wird mit angenommenen, gleichwohl am Landesdurchschnitt orientierten durchschnittlichen dGz-Werten gerechnet:

[1] Zur Baumart „Eiche“ werden in der vorliegenden Arbeit Traubeneiche, Stieleiche und nicht näher definierte Mischformen dieser beiden Arten gezählt. Die Roteiche als nicht dauerhafte Holzart und damit für konstruktive Verwendungen im Außenbereich ungeeignet bleibt in der Auswertung unberücksichtigt.

- Eiche: dGz_{100} von 7,0 Vfm*ha^{-1}
- Kastanie: dGz_{100} von 9,0 Vfm*ha^{-1}
- Robinie: dGz_{80} von 5,0 Vfm*ha^{-1}

Mit den Ertragstafeln lässt sich nun abschätzen, in welchem Alter eine Eiche (bzw. Kastanie oder Robinie) den gewünschten Mindest-Brusthöhendurchmesser (20 cm m.R.) erreicht und in welchem Alter der BHD-Bereich der sogenannten schwächeren Sortimente wieder verlassen wird (ca. 30 cm m.R.). Es zeigt sich, der BHD-Bereich, in dem bei einer Durchforstung die gesuchten schwächere Sortimente anfallen, im Alter zwischen ca. 50 und ca. 80 Jahren durchwachsen wird. Dies bedeutet, dass Bestände, die heute zwischen ca. 50 und ca. 80 Jahre alt sind, aktuell potenzielle Lieferanten von schwächeren Sortimenten für konstruktive Zwecke im Sinne des Projektes sind. In 10 Jahren übernehmen diese Funktion diejenigen Bestände, die heute zwischen 40 und 70 Jahre alt sind, in 30 Jahren diejenigen Bestände, die heute zwischen 20 und 50 Jahre alt sind. Diese Annahmen basieren auf dem Modell des Altersklassenwaldes und setzen voraus, dass in den nächsten drei Jahrzehnten keine gravierenden Änderungen der jeweiligen Baumartenanteile an der Holzbodenfläche stattfinden.
Betrachtet man Abbildung 1, so wird deutlich, dass bei den Baumarten Edelkastanie und Robinie in den betreffenden 1 ½ Altersklassen III (immer nur zu 50% berücksichtigt) und IV im öffentlichen Wald heute und auch in Zukunft nur sehr beschränkte Flächen zur Verfügung stehen. Ein ganz anderes Bild bietet sich bei der Eiche. Im Gegensatz zu den Baumarten Kastanie und Robinie verfügt die Eiche in allen Altersklassen über relativ große Flächen (Abbildung 2).

1.4.2.2 Schätzung der jährlichen Nutzungsmengen aus Durchforstungen

Geht man vereinfachend davon aus, dass Durchforstungen in den betreffenden 1 ½ Altersklassen die Hälfte des in diesen Perioden laufenden Gesamtzuwachses (lGz) abschöpfen und der ausscheidende Bestand zur Hälfte aus schwachem Stammholz besteht, so lässt sich errechnen, dass im öffentlichen Wald bei den Baumarten Edelkastanie und Robinie derzeit jährlich nur relativ geringe Mengen an Durchforstungsvolumina [2] für eine Vermarktung als Sortiment „schwaches Stammholz“ zur Verfügung stehen. So sind dies bei der Kastanie rund 540 Efm und bei der Robinie rund 250 Efm. In den nächsten Jahrzehnten ist aufgrund der mehr oder weniger gleichbleibenden Baumartenflächen bei beiden Baumarten nur ein geringfügiger Anstieg des Anfalls der gesuchten Sortimente zu erwarten.
Auch bei der Eiche kann das aktuelle jährliche Durchforstungsvolumen in den schwachen Stammholzklassen mit Hilfe der Ertragstafel geschätzt werden. Analoge Berechnungen wie bei den anderen beiden Baumarten zeigen, dass über die nächsten 30 Jahre hinweg jährlich durchschnittlich rund 15.000 Efm schwaches Stammholz zur Verfügung stehen dürften.
Diese Schätzungen gelten nur für den öffentlichen Wald und nur für den Fall, dass weder Einfuhren nach Baden-Württemberg noch Ausfuhren aus Baden-Württemberg stattfinden und alles schwache Stammholz der Stärkeklassen D 1b und D 2a verfügbar ist.

1.4.2.3 Regionale Schwerpunkte der Nutzungsanfälle

Eine detaillierte Betrachtung der Baumartenflächen nach Landkreisen (Tab. 3 bis 5) ergibt ein differenziertes Bild. In diese Tabellen fließen nur Flächen des öffentlichen Waldes ein, welche in den jeweils angegebenen Jahren den entsprechenden Altersklassen angehören bzw. zukünftig angehören werden (siehe Ausführungen oben). Der Privatwald bleibt bei den folgenden Ausführungen unberücksichtigt.

---

[2] Bei der Kastanie beträgt der laufende jährliche Gesamtzuwachs rund 13,6 Vfm*ha-1, was unter der oben genannten Annahme ein Durchforstungsvolumen von 6,8 Vfm*ha-1 oder 5,4 Efm*ha-1 ergibt. Multipliziert mit dem Stammholzanteil von 0,5 und der der Altersklassenfläche von rund 200 ha ergibt sich ein jährliches Volumen von rund 540 Efm. Die entsprechende Berechnungen für die Robinie lauten: 4,7 Vfm*ha-1 *0,5 *0,5 *0,8 = 0,94 Efm*ha-1. Bei 270 ha Fläche ergibt sich ein jährliches Volumen von rund 250 Efm.

Edelkastanie

Erwartungsgemäß gibt es bei der **Edelkastanie** (Tab. 3) zahlreiche Landkreise, die heute und auch in Zukunft über keinerlei flächige Vorkommen dieser Baumart verfügen (in Tabelle nicht aufgeführt). Die Tabelle zeigt im oberen Teil die vier Landkreise mit den flächenmäßig bedeutendsten Vorkommen der Edelkastanie. In diesen vier Landkreisen finden sich heute und auch in den nächsten 30 Jahren rund 4/5 aller Edelkastanienflächen. Es zeigt sich, dass der Flächenumfang sowohl in diesen vier Kreisen als auch im gesamten Land Baden-Württemberg mehr oder weniger konstant bleibt, so dass mit keinem gravierenden Einbruch oder Anstieg der Nutzungsmenge an Kastanienholz zu rechnen ist. Allerdings ist bei einem jährlichen geschätzten Nutzungsanfall im öffentlichen Wald Baden-Württembergs von nur rund 540 Efm (Sortiment Stammholz D 1b und D 2a) nicht gewährleistet, dass eine hohe jährliche Nachfrage nach diesen Sortimenten befriedigt werden kann.

Tab. 3: Edelkastanie - Baumartenflächen der Altersklassen III (½ Fläche) und IV nach Landkreisen und Prognosejahren

Edelkastanie				
Kreis	**Jahr 2012**	**Jahr 2022**	**Jahr 2032**	**Jahr 2042**
Rastatt	30 ha	25 ha	22 ha	25 ha
Heidelberg	42 ha	39 ha	30 ha	25 ha
Rhein-Neckar-Kreis	27 ha	31 ha	31 ha	27 ha
Ortenaukreis	62 ha	79 ha	94 ha	92 ha
Summe ausgewählte Kreise	**161 ha**	**174 ha**	**177 ha**	**169 ha**
Alle Kreise Bad.-Württ.	**202 ha**	**216 ha**	**214 ha**	**198 ha**
Anteil an "Alle Kreise Bad.-Württ."	**80%**	**81%**	**83%**	**85%**

Robinie

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Baumart Robinie (Tab. 4). Auch hier gibt es zahlreiche Kreise, die praktisch kein flächiges Vorkommen ausweisen (in Tab. nicht aufgeführt). Allerdings ist die Konzentration auf wenige Kreise nicht ganz so stark ausgeprägt wie bei der Baumart Edelkastanie: Acht Kreise stellen zusammen rund ¾ des Robinienvorkommens in Baden-Württemberg. Auch hier wird deutlich, dass zwar gegenüber heute kein Rückgang der Flächen, aber auch kein gravierender Anstieg des Flächenumfangs und damit auch kein bedeutender Anstieg der Nutzungsmenge zu erwarten ist.

Tab. 4: Robinie - Baumartenflächen der Altersklassen III (½ Fläche) und IV nach Landkreisen und Prognosejahren

Robinie				
Kreis	**Jahr 2012**	**Jahr 2022**	**Jahr 2032**	**Jahr 2042**
Heilbronn Landkreis	12 ha	15 ha	17 ha	17 ha
Karlsruhe Landkreis	28 ha	33 ha	29 ha	21 ha
Rastatt	19 ha	22 ha	20 ha	16 ha
Rhein-Neckar-Kreis	58 ha	65 ha	54 ha	34 ha
Breisgau-Hochschwarzwald	31 ha	45 ha	55 ha	51 ha
Emmendingen	12 ha	20 ha	31 ha	34 ha
Ortenaukreis	17 ha	18 ha	19 ha	19 ha
Lörrach	16 ha	20 ha	26 ha	27 ha
Summe ausgewählte Kreise	**193 ha**	**237 ha**	**250 ha**	**218 ha**
Alle Kreise Bad.-Württ.	**267 ha**	**321 ha**	**340 ha**	**305 ha**
Anteil an "Alle Kreise Bad.-Württ."	**72%**	**74%**	**74%**	**72%**

Eiche

Bei der Baumart Eiche (Tab. 5), die allgemein über deutlich größere Baumartenflächen verfügt, ist die Verteilung nach Landkreisen ausgewogener. Zwar gibt es auch hier Landkreise, in denen keine großen Eichenflächen vorhanden sind, im Allgemeinen wird diese Baumart jedoch in ganz Baden-Württemberg angetroffen. Die zehn eichenreichsten Landkreise stellen sowohl heute als auch in 30 Jahren rund 60 % der Eichenflächen in den Altersklassen III (½ Fläche) und IV und damit auch den Großteil der nutzbaren schwächeren Stammholzsortimente. Die Versorgung mit schwächerem Eichenstammholz kann damit - innerhalb bestimmter Grenzen - als gesichert gelten.

Tab. 5: Eichen - Baumartenflächen der Altersklassen III (½ Fläche) und IV nach Landkreisen und Prognosejahren

Eichen				
Kreis	**Jahr 2012**	**Jahr 2022**	**Jahr 2032**	**Jahr 2042**
Karlsruhe Landkreis	798 ha	850 ha	824 ha	746 ha
Neckar-Odenwald-Kreis	546 ha	541 ha	703 ha	871 ha
Main-Tauber-Kreis	474 ha	494 ha	594 ha	674 ha
Heilbronn Landkreis	645 ha	519 ha	405 ha	418 ha
Enzkreis	458 ha	394 ha	383 ha	436 ha
Rhein-Neckar-Kreis	498 ha	452 ha	392 ha	377 ha
Ortenaukreis	400 ha	404 ha	432 ha	456 ha
Tübingen	351 ha	322 ha	299 ha	306 ha
Schwäbisch-Hall	285 ha	339 ha	370 ha	345 ha
Emmendingen	288 ha	279 ha	238 ha	206 ha
Summe ausgewählte Kreise	**4.743 ha**	**4.594 ha**	**4.641 ha**	**4.836 ha**
Alle Kreise Bad.-Württ.	**8.129 ha**	**8.006 ha**	**7.914 ha**	**7.945 ha**
Anteil an "Alle Kreise Bad.-Württ."	**58%**	**57%**	**59%**	**61%**

1.4.3. Ergebnisse der Befragung von Kreisforstämtern

Mittels Fragebogen wurde erhoben, wie viel Waldfläche je Eigentumsart (Staatswald, Kommunalwald, Privatwald, Bundeswald) aktuell bewirtschaftet bzw. (im Privatwald) betreut wird. Des Weiteren wurden die aktuell anfallenden Holzmengen nach Sortimenten (in Festmetern) abgefragt sowie die in 10, 20 und 30 Jahren voraussichtlich anfallenden Holzmengen nach Sortimenten. Zusätzliche Angaben betrafen die aktuelle Vermarktung dieser Sortimente (Brennholz, Pfähle, Industrieholz, Sägeholz oder „keine Verwendung“). Abschließend wurden die Behörden gebeten mitzuteilen, ob sie daran interessiert sind, eine Bereitstellung in gezielter Form zu fördern und ob sie das Marktpotenzial positiv oder negativ einschätzen. Hintergrund der letzten Frage war die beabsichtigte Erfassung derjenigen (Kreis-)Forstämter in Baden Württemberg und im südlichen Rheinland-Pfalz, die an einer höherwertigen Vermarktung dieser speziellen Sortimente interessiert sind. Durch diese Daten sollte es ermöglicht werden, für die betreffenden Baumarten Kastanie, Robinie und Eiche die Entwicklung der anfallenden Holzmengen in den kommenden 30 Jahren darzustellen. Hierbei geht es um die Stärkeklassen D 1b und D 2a. Die Stämme haben einen entsprechenden Mindestbrusthöhendurchmesser mit Rinde von 20 cm bis maximal 30 cm.

Sie dürfen diverse Holzfehler und leichte Krümmungen aufweisen, welche die konstruktive Verwendung nicht einschränken, und sollten in die Güteklassen B oder C einsortiert sein. Bei den Ergebnissen ist zu beachten, dass geschätzte Angaben zu den zukünftigen Nutzungen aus allen Waldbesitzarten, d.h. inklusive Privatwald, eingeflossen sind. Die Ergebnisse der Befragung zeigen, dass in den kommenden Jahrzehnten zahlreiche Landkreise jährlich nennenswerte Mengen an schwächerem Eichen-Stammholz zu nutzen beabsichtigen. Leider haben mehrere Landkreise, die laut staatlicher Forsteinrichtungsstatistik über umfang-

Tab. 6: Prognose der Kreisforstämter zu voraussichtlichen Nutzungsmengen nach Baumarten in 10, 20 und 30 Jahren

	Eiche (Fm)				Robinie (Fm)				Edelkastanie (Fm)			
Kreis	**Heute**	**in 10 J.**	**in 20 J.**	**in 30 J.**	**heute**	**in 10 J.**	**in 20 J.**	**in 30 J.**	**heute**	**in 10 J.**	**in 20 J.**	**in 30 J.**
Alb-Donau-Kreis	800	1.000	1.500	2.000	0	0	0	0	0	0	0	0
Ortenau-Kreis	500	300	200	400	20	20	20	20	500	1000	1500	1000
Main-Tau-ber-Kreis	2.000	3.000	4.000	5.000	50	50	50	50	20	20	20	20
Stadt Stuttgart	1.000	1.000	800	800	80	100	100	100	0	0	0	0
Kreis Esslingen	500	400	300	200	0	0	0	0	0	0	0	0
Stadt Biberach	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Kreis Emmendingen	350	380	400	400	25	30	35	35	15	20	25	30
Kreis Biberach	75	350	750	1.300	0	0	0	0	0	0	0	0
Kreis Sigmaringen	300	560	870	680	0	0	0	0	0	0	0	0
Kreis Heilbronn	250	200	150	150	20	20	20	20	0	0	0	0
Kreis Lörrach	150	130	130	100	50	50	50	50	0	0	0	0
Kreis Reutlingen	100	100	100	70	0	0	10	10	0	0	0	0
Kreis Tübingen	400	4.000	8.000	12.000	5	50	100	150	0	0	0	0
Zollern-Alb-Kreis	20	50	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt:	**6.545**	**11.570**	**17.400**	**23.300**	**250**	**320**	**385**	**435**	**535**	**1.040**	**1.545**	**1.050**

reiche Eichen-Flächen verfügen, nicht an der Befragung teilgenommen (z.B. Landkreis Karlsruhe, Neckar-Odenwald-Kreis, Rhein-Neckar-Kreis), so dass die Befragungsergebnisse (Zeile „Gesamt“) den Anfall dieses Sortiments vermutlich stark unterschätzen. Beim Kreis Tübingen fällt auf, dass die geschätzte Nutzungsmenge im Jahr 2042 gegenüber heute um den Faktor 30 ansteigt, obwohl laut Forsteinrichtungs-statistik im öffentl. Wald nur eine geringe Zunahme der entsprechenden Eichenflächen erfolgen wird.

Bei der Baumart **Robinie** tritt ein ähnlicher Effekt auf. Auch hier werden aufgrund des Fehlens von robinienreichen Landkreisen (Rhein-Neckar-Kreis, Kreis Breisgau-Hochschwarzwald) die tatsächlich jährlich zur Verfügung stehenden Nutzungsmengen vermutlich deutlich unterschätzt.

Bei der Baumart **Edelkastanie** ist mit dem Ortenaukreis nur einer der vier bedeutendsten Lieferanten (im öffentlichen Wald) von Edelkastanienholz in der Befragung vertreten. Allerdings ist dieser eine Kreis der mit großem Abstand wichtigste Kreis, wenn es um die Edelkastanie geht. Die in der Befragung von den Kreisen genannte Nutzungsmenge aus allen Waldbesitzarten liegt deutlich über der Menge, die aus dem öffentlichen Wald Baden-Württembergs zu erwarten ist: Die in der Befragung genannte Menge ist im Durchschnitt ungefähr doppelt so hoch wie die Menge aus den Forsteinrichtungsdaten über den öffentlichen Wald. Dies ist ein weiteres Indiz für die hohe Bedeutung des Privatwaldes beim Vorkommen von Kastanienholz.

1.5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

In der Zusammenschau der Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden wird deutlich, dass in Baden-Württemberg (Gesamtwald, alle Waldbesitzarten) bei den untersuchten Baumarten und im entsprechenden Sortiment „schwaches Stammholz“ (Stärkeklasse D 1b, D 2a) über die nächsten 30 Jahre mit je nach Baumart sehr unterschiedlichen jährlichen Nutzungsmengen zu rechnen ist. Erstaunlicherweise gilt für alle Baumarten, dass die Flächen in den entsprechenden Altersklassen und damit vermutlich auch die potenziellen Nutzungsmengen weder erheblich zunehmen noch erheblich abnehmen werden. Inwieweit die nachfolgend genannten Mengen tatsächlich für konstruktive Zwecke im Sinne des Projektes zur Verfügung stehen oder teilweise für andere Zwecke und an andere Abnehmer verkauft werden, kann, da diese Verteilung den bekannten Marktmechanismen von Angebot und Nachfrage unterliegt, nicht prognostiziert werden.

Bei der **Baumart Eiche** (Steileiche, Traubeneiche) ist mit einem jährlichen Anfall von mindestens 15.000 Efm schwachem Stammholz zu rechnen. Eichenstammholz fällt in zahlreichen Kreisen im Land an (siehe Tabelle), vor allem im öffentlichen Wald, so dass eine Holzbeschaffung relativ einfach und mit geringen Transportkosten verbunden sein dürfte.

Bei der **Baumart Robinie** kann beim entsprechenden Sortiment mit einem nur sehr geringen jährlichen Holzaufkommen von rund 250 bis 400 Efm gerechnet werden. Die Robinien stehen vor allem im öffentlichen Wald, so dass Informationen über Bestände und Nutzungsmöglichkeiten relativ einfach bei den oben genannten Kreisforstämtern eingeholt werden können, was die Planung der Holzbeschaffung erleichtert. Gleichwohl ist eine kontinuierliche Versorgung mit größeren Mengen Robinienholz aus Baden-Württemberg derzeit nicht gewährleistet.

Die **Baumart Edelkastanie** ist in einem räumlich eng begrenzten Gebiet (Fläche des Ortenaukreises in der sogenannten Vorbergzone des Wuchsgebietes Schwarzwald) konzentriert anzutreffen, so dass die Holzbeschaffung vornehmlich dort erfolgen könnte. Kleinere Vorkommen befinden sich zusätzlich in den Kreisen Heidelberg, Rastatt und Rhein-Neckar-Kreis. Insgesamt können jährliche Nutzungsmengen in Höhe von rund 1.000 bis 1.500 Efm erwartet werden. Entgegen den beiden anderen untersuchten Baumarten ist die Edelkastanie vor allem im Privatwald anzutreffen, was zum einen die Datenlage unsicher macht und zum anderen die Holzmobilisierung erschwert. Bei der Holzbeschaffung ist eine Zusammenarbeit mit dem örtlichen Forstdienst oder mit eventuell bestehenden Forstbetriebsgemeinschaften von Vorteil.

1.6. LITERATUR

FVA (2005): Bundeswaldinventur II – Regionale Ergebnisse für Baden-Württemberg. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Bericht (CD). 732 S.

GLEISSNER, H. (2012): Eine Studie über den Sortimentsanfall von Eiche, Robinie und Kastanie im südwestdeutschen Raum, zur höherwertigen Verwendung von schwachem Laubholz mit guter, natürlicher Dauerhaftigkeit. Bericht, unveröff. Univ. Freiburg, Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft. 18 S. und Anlagen.

LFV (1993): Hilfstabellen für die Forsteinrichtung. Landesforstverwaltung Bad.-Württ. (Hrsg.). Min. für Ländl. Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Bad.-Württ., Stuttgart., 188 S.

2. TEILPROJEKT 2: ERKENNUNG INNERER HOLZ-MERKMALE VON KASTANIE, EICHE UND ROBINIE MITTELS COMPUTERTOMOGRAFIE

2.1. EINFÜHRUNG

Ziel des F&E-Projekts „CT-SPEC – Von der röntgen gestützten Rundholzvermessung direkt zur Konstruktionsplanung“, ist es, natürlich gewachsenes Stammholz für zuverlässig tragende - vor allem frei bewitterte - Konstruktionen verfügbar zu machen. Die Auswahl von Eiche, Kastanie und Robinie als Untersuchungsmaterial folgte dem Versuchsansatz, die Stämme dauerhafter Hölzer für solche Konstruktionen zu testen. Da nur der Holzzylinder maßgeblich zur Tragfähigkeit und Festigkeit beiträgt, muss für die Abschätzung das nichttragendes Material, d.h. die Rinde, aus der Berechnung ausgeschlossen werden. Vor diesem Hintergrund wurden Kastanien, Eichen und Robinienstämme unterschiedlicher Durchmesserklassen mit einem Computertomografen (CT) gescannt. Dieser zum Zweck der Holzforschung entwickelte CT erlaubt eine hohe räumlich hochaufgelöste Visualisierung und Analyse bei den Untersuchungen und ermöglicht auf nichtzerstörende Weise Aussagen über äußere und innere Merkmale der gescannten Stämme.

In Vorversuchen für die Baumart Robine konnte bereits gezeigt werden, dass mit der auf CT-Messungen basierenden, numerisch berechneten Querschnittsfläche der Stammabschnitte und der in Versuchen ermittelten Drucksteifigkeit die Drucktragfähigkeit von natürlich gewachsenen Stammabschnitten außergewöhnlich gut abschätzbar ist (BLAß et al. 2010). Für die Vorstudie wurde die Grenze zwischen Rinde und Holzkörper der Robinie mittels festgelegter Schwellwerte der Grauwerte in den CT-Bildern ermittelt (BRÜCHERT et al. 2010).

Die hier beschriebenen Untersuchungen zielen auf die Bestimmung von Rinden-, Splint- und Kernholzanteil ausgewählter Stämme ab. Durch Einsatz digitaler Bildverarbeitung werden die auf den CT-Bildern erkennbaren Holzeigenschaften ausgewertet und in einem automatisierten Verfahren bestimmt. Die Genauigkeit der somit gewonnenen Ergebnisse wird mit Hilfe mikroskopischer Messungen an präparierten Stammscheiben überprüft.

Die aus den CT-Bildern abgeleiteten Ergebnisse ermöglichen, drei-dimensionale (3D) Modelle der jeweiligen Stammabschnitte und deren unterschiedlichen Holzmerkmale zu erstellen. Diese können unter anderem zur Prognostizierung der Druckbruchfestigkeit herangezogen werden.

2.1.1. Allgemeine Charakteristik ringporigen Holzes

Kastanie, Eiche und Robinie zählen zu den ringporigen Hölzern. Das Holz dieser Laubbaumarten zeichnet sich im Querschnitt durch markante Jahrringstrukturen aus, welche auch mit dem bloßen Auge gut zu erkennen sind.

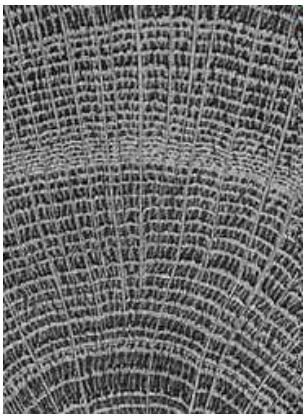

Abb. 3: Querschnitt einer Eiche (Quelle: www.woodanatomy.ch)

Sie resultieren aus weitlumigen Gefäßen im Frühholz, sowie englumigen Tracheiden und Holzfasern im Spätholz. Entsprechend unterschiedlich ist die Dichte innerhalb der einzelnen Jahrringe verteilt (RICHTER 2007) (Abb. 2)

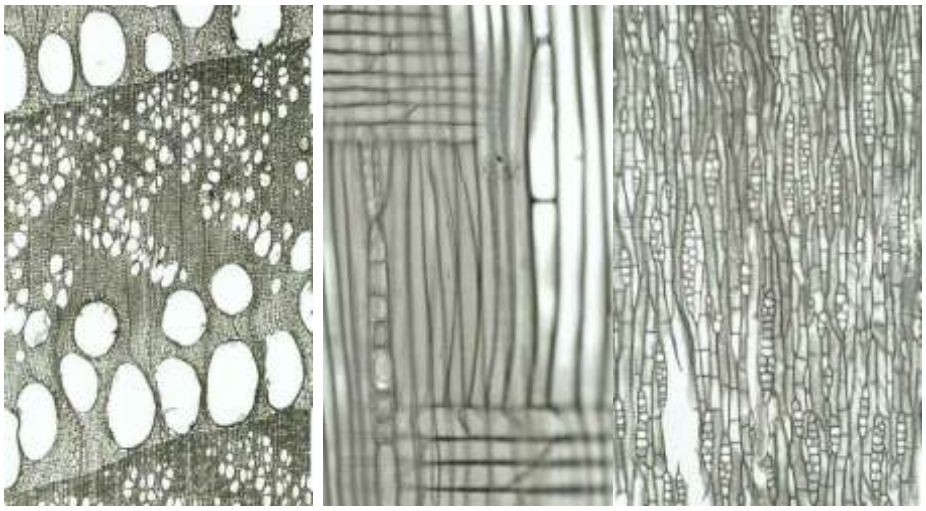

Abb. 4: Transversalschnitt, Radialschnitt, Tangentialschnitt, Kastanie. (Ref: www.woodanatomy.ch)

Ringporiges Holz leitet Wasser fast ausschließlich in der äußeren Zuwachszone. Eine Verkernung des inneren Teils des Stammes ist bei ringporigen Hölzern - mit Ausnahme der Esche - obligatorisch, je nach Baumart tritt diese jedoch erst ab einem Alter von 20 bis 40 Jahren ein.
Bei diesem aktiven Vorgang werden Öle, Gummi, Harze, Gerbstoffe, Farbstoffe, Kalzium und Silizium in die Zellwände eingelagert. Wasser und Speicherstoffe werden abgegeben. Dabei füllen sich die Gefäße mit Luft und werden durch benachbarte Parenchymzellen, die in die Tüpfel einwachsen, verschlossen (Tyllenbildung). Durch die Oxidation eingelagerter Gerbstoffe (Phenole) verfärbt sich das Holz und ist dadurch optisch leicht vom Splintholz zu unterscheiden. Durch die Verkernung erhöht sich auch die Dauerhaftigkeit des Holzes.
Die Rinde ringporiger Hölzer setzt sich aus der aus lebenden Zellen bestehenden inneren Rinde sowie der aus abgestorbenen Zellen bestehenden Außenrinde oder Borke zusammen. Den größten Teil der inneren Rinde bildet das Phloem oder Bast, welcher Nährstoffe wie Zucker und Aminosäuren transportiert. Die in dieser Studie untersuchten Baumarten bilden eine netzartige Schuppenborke aus. Diese reißt auf Grund ihres hohen Faseranteils netzartig auf (KUPFERSCHMID 2001).
Auf Grund des höheren Ligningehaltes und geringeren Zellulosegehaltes liegt die Reindichte der Borke niedriger als die des Bastes oder des Holzes (SACHSSE 1996). Auch ist die Raumdichte der äußeren Rinde niedriger als die der inneren (FOURNIER & GOULET 1970, SELL & SCHNELL 1988, METTE & KORELL 1989 und WAGENFÜHR 1996).

Tab. 7: Reindichte Holz und Rindengewebe

Gewebetyp	**Reindichte (g/cm³)**
Borke	1,35
älterer, funktionsunfähiger Bast	1,54
Holz	1,50-1,52

Tab. 8: Kennzahlen zur Rinde verschiedener Nadel- und Laubholzarten

Heizwert der Rinde in absolut trockenem Zustand, Aschegehalt und Raumdichtezahl der Rinde für einige ausgewählte Nutzholzarten (Quellen: Fournier & Goulet 1970, Sell & Schnell 1988, Mette & Korell 1989 und Wagenführ 1996).

Art	Heizwert der Rinde (kJ/kg)	Aschegehalt (%)	Rohdichte R_{12} (kg/m³)	Raumdichtezahl (kg/m³) Bast	Borke
Abies alba	19 080	2.6	460 - 470		
Larix decidua	19 240 – 19 800	1.2	325 - 380		
Picea abies	17 840 – 18 930	3.3	310 – 400	(420)	
Pinus silvestris	20 160	1.5	300 – 490	(340)	
Pseudotsuga menziesii	21 030 – 22 750		310	500	
Tsuga canadensis	21 800	1.6		400 - 540	
Acer pseudoplatanus			530 - 740		
Acer rubrum	18 750			750	
Acer saccharum	18 060	6.3		670	470
Alnus glutinosa			426 - 440		
Alnus rubra	19 600	6.0			
Betula alleghaniensis	22 250	1.7		530	
Betula verrucosa			562 - 770		
Carpinus betulus					
Fagus sylvatica	16 560 – 17 620	7.2	579 - 920	710	
Fraxinus excelsior			457		
Platanus occidentalis	18 400	5.8			
Populus tremula			590	400	
Populus tremuloides	20 750	4.0	480	400	490
Quercus alba	17 400	10.7		760	630
Quercus robur	18780		423 - 530		
Salix nigra	17 900	6.0	650		
Tilia sp.			342 - 610		
Ulmus americana	17 250	9.5		400	390
Ulmus glabra			400 - 630		

2.1.2. Computertomographie und Holzforschung

Für die Holzindustrie ist Kenntnis über die inneren Holzeigenschaften der zu bearbeitenden Stämme von großer Bedeutung. Durch die Kenntnis innerer Holzstrukturen kann die Lage des Einschnitts zur Optimierung der Produktion genauer festgelegt und somit die Ausbeute und das ökonomische Ergebnis erhöht werden. Durch die Erkennung der Rinde kann auf das tatsächliche Volumen des Holzkörpers geschlossen werden. Kenntnisse über die Dichte und den Feuchtigkeitsgehalt des Holzes haben entscheidenden Einfluss auf die Effizienz des Produktionsablaufes. So lässt sich der Trocknungsprozess bei bekannter Holzfeuchte optimal gestalten und die Kenntnis über die Dichteverteilung des Holzes erlaubt beim Einschnitt eine verbesserte Qualität. Zusätzlich kann der Einschnitt verbessert werden, wenn zu dem innere Fehler wie Totäste oder Fäule erkannt werden können. Schätzungen zur Verbesserung des Einschnitts reichen von 3% bis hinzu 28% abhängig je nach Baumart (PETER 1962, 1967; WAGNER et al. 1989; GUDDANTI & CHANG 1998; SCHMOLDT et al. 2000b; LEMIEUX et al. 2002; RINNHOFER et al. 2003).

Durch den Einzug der Röntgen Technologie in der Holzforschung in den 1980er Jahren (HODGES et al. 1990) entstand die Möglichkeit, ohne destruktiven Eingriff die inneren Holzmerkmale eines Stammes zu erkennen. Der Einsatz von Scannern mit feststehenden Röntgenquellen ergibt zwei-dimensionale (2D) Darstellungen und hat damit den Nachteil, dass sich überlagernde Holzfehler häufig zu Fehlinterpretationen der Aufnahmen führen. Auch konnten die Merkmale räumlich nicht genau lokalisiert werden (WEI et al. 2011).

Diese Nachteile können durch den Einsatz von Computer-Tomographen behoben werden, bei dem ein dreidimensionales Bild des Stammes rekonstruiert wird.

2.1.2.1 Prinzip der CT-Technologie

In CT-Systemen rotiert eine Röntgenquelle um volle 360° senkrecht zur Längsachse des zu scannenden Objektes (Abb. **5**). Dabei wird die breitgefächerte Strahlung der Röntgenquelle von Sensoren auf der jeweils gegenüberliegenden Seite gemessen. Nach Vollendung einer Rotation, wird der Röntgen Absorption-Koeffizient des Objektes (μ_x) berechnet und in Relation zum entsprechenden Absorbstions-Koeffizienten von Wasser μ_{water} normalisiert. Dies ergibt den CT-Wert oder Hounsfield Wert (H): (WEI et al. 2007, WEI et al. 2011).

CT Wert = H = 1000 x $(\mu_x - \mu_{water}) / \mu_{water}$
Nach dieser Formel schwankt H zwischen den Werten -1000 für Luft und 1000 für Gegenstände mit der doppelten Abschwächung von Wasser. Wasser selbst erhält den Wert 0. Da die meisten H Werte im negativen Bereich liegen, werden die Werte häufig um 1000, 1024 oder 1035 verschoben, um ausschließlich positive Werte zu erhalten (WEI et al. 2011).

Abb. 5: CT-Scanner mit Baumstamm

Das so berechnete CT-Bild wird als räumliche Rastergrafik (Slice) gespeichert. Die Dimension eines Voxels (3D-Bildpunkt, zusammengesetzt aus *volumetric* und *pixel*) in Längs- und Querrichtung hängt von der Auflösung der Rastergrafik ab und ist frei wählbar. Sie wird jedoch effektiv durch die optische Auflösung der Sensoren limitiert. Die zurzeit kleinste optische Auflösung für industrietaugliche CT-Scanner im Holzbereich liegt im Bereich von 1 mm. Die Tiefe eines Voxels ergibt sich durch die Breite des Röntgenstrahls und den Vorschub der Röntgenquelle während einer Rotation (SCHMOLDT et al 2000b, WEI et al. 2011).
Durch aufeinander folgende Aufnahmen lässt sich somit ein gesamter Baumstamm erfassen. Die Gesamtheit der aufgenommenen Slices bildet den räumlichen Datensatz des Stammes und ermöglicht, diesen in beliebigen Perspektiven und Schnitten darzustellen (SCHMOLDT et al 2000b).

2.1.2.2 Dichte und Feuchtigkeitsgehalt im CT-Bild

Die Dämpfung der Röntgenstrahlung und somit der H-Wert des Holzes ist direkt abhängig vom durchstrahlten Material; im Fall von waldfrischem Holz ist dies die Holzdichte des frischen Stammes (CF.TSAI & CHO 1976; LINDGREN 1991a, 1991b; DAVIS & WELLS 1992; MACEDO et al. 2002; BUCUR 2003a). Die

Holzfeuchte beeinflusst die Dichte des Holzes maßgeblich. Je feuchter das Holz, desto dichter ist es (SIMPSON 1993). Bereits Unterschiede in der Dichte von 1-2% lassen sich mittels CT erkennen (SCHMOLDT et al 2000b). So liegt es nahe, dass sich die ersten Anwendungen der CT-Technologie in der Holzindustrie auf die Untersuchung der Holzdichte konzentrierten. Die unterschiedlichen Holzmerkmale wie Rinde, Äste, Fäule, Splint- und Kernholz haben jeweils eine spezifische Dichte und Feuchte und lassen sich somit auf dem CT-Bild voneinander unterscheiden (SCHMOLDT et al 2000b). Auch Jahrringe können mit Hilfe von CT-Bildern erkannt werden (BORIANNE et al. 2011), jedoch begrenzt hier die räumliche Auflösung der Bilder die Möglichkeiten einer quantitativen Bestimmung. Die detektierbaren Holzmerkmale erscheinen jedoch nicht immer mit denselben Dichtekontrasten in der Visualisierung des CT, sondern können stark variieren. Mit zunehmender Trocknung des Holzes schwindet der Feuchtigkeitsgehalt und verringert somit Dämpfung der Röntgenstrahlung. Die Kontraste innerhalb eines Stammes verändern sich je nach Lagerungszustand (Abb. **6**, WATANABE et al. 2012).

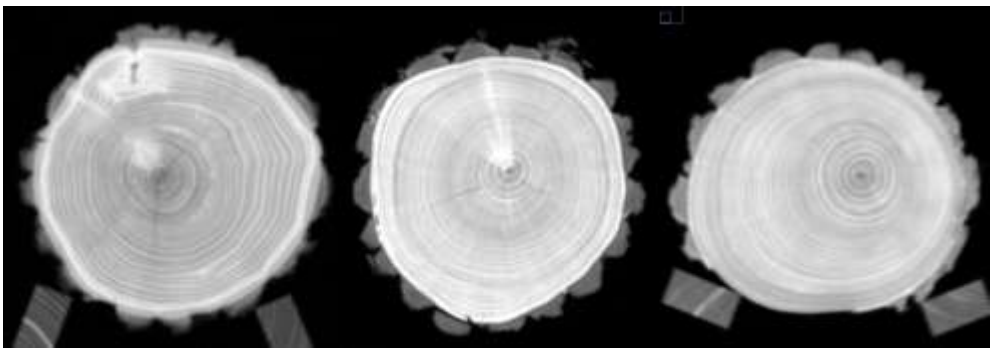

Abb. 6: Unterschiedlicher Frischegrad bei Robinie. Direkt nach Einschlag, ½ Jahr, 1 Jahr

2.1.3. Erkennung von Rinde, Splint- und Kernholz

Durch die Einlagerung von anorganischen und organischen Substanzen und die Speicherung von Wasser hat Kernholz in der Regel eine höhere Dichte als Splintholz (ROJAS et al. 2005). Durch einen geringeren Zellulosegehaltes weist die Rinde meist eine geringere Dichte auf als der Holzkörper, andererseits befindet sich oft gerade in Kambiumnähe ein hoher Wassergehalt im aktiven Bast, was die Erkennung des Übergang zum wasserführenden Splint erschwert.

Besonders bei Nadelhölzern lassen die unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalte von Kern- und Splintholz in der Regel eine gute Unterscheidung der beiden Holzmerkmale zu (Abb. **7**). Mit fortschreitender Trocknung wird eine sichere Erkennung jedoch erschwert (BJÖRKLUND 1999).

Bei deutlichen Unterschieden zwischen Kernholz, Splintholz und Rinde kann bereits durch Setzen eines Schwellwertes der Hounsfieldwerte oder GRauwerte sicher zwischen den jeweiligen Merkmalen unterschieden werden (GRUNDBERG & GRÖNLUND 1991, 1992, LONGUETAUD et al 2007, BRÜCHERT et al. 2010). Andere gängige Ansätze sind Klassifizierungen wie die Maximumlikelihood-Klassifizierung, bei der mit Hilfe von Trainingsklassen die Wahrscheinlichkeit für jeden Pixel berechnet wird, mit der dieser in die vorgegebenen Klassen gehört (WEI et al 2008). Ein anderer Ansatz ist die Fehlerrückführung in künstlichen neuronalen Netzen (BP-ANN) (SCHMOLDT et al. 1996, 1998, 2000a, HE 1997).

Für die meisten Laubhölzer sind diese Ansätze jedoch nicht oder nur schwer anwendbar, da die Kontraste zwischen den Merkmalen bei diesen zu schwach sind. In der Literatur finden sich nur wenige Studien, bei denen Kernholz von Laubhölzern untersucht wurden. Darunter sind Zuckerahorn (Acer saccharum) (WEI et al 2008) und der Tulpenbaum (Liriodendron tulipifera) (SCHMOLDT et al. 2000a).

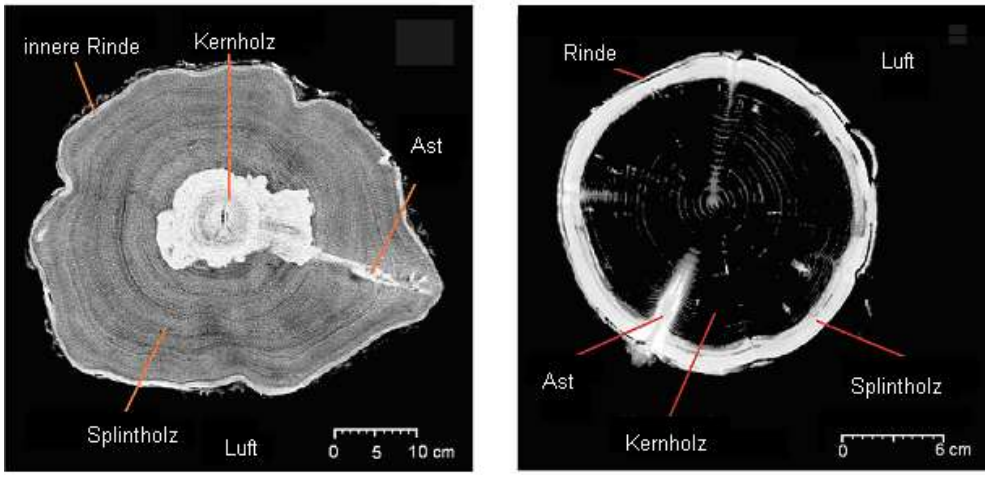

Abb. 7: Vergleich von CT-slices von Acer saccharum (links) und Picea mariana (rechts) Stämmen (nach WEI et al 2011)

2.1.4. Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Studie ist die Erkennung innerer Holzmerkmale von Robine (*Robinia pseudoacacia*), Eiche (*Quercus spec.*) und Kastanie (*Castanea sativa*). Im Vordergrund steht dabei die automatisierte Erkennung der Rinde. Des Weiteren soll versucht werden, die Grenzlinie zwischen Splint- und Kernholz automatisiert zu erkennen.
Kapitel 2.2 beschreibt im Folgenden die Methodik zur Herleitung und Validierung der Erkennungsverfahren. In Kapitel 2.3 und 2.4 werden die entwickelten Erkennungsverfahren beschrieben sowie die Ergebnisse der Stammanalysen präsentiert. In Kapitel 2.5 werden die Ergebnisse zusammenfassend diskutiert.

2.2. MATERIAL UND METHODEN

Zur Herleitung der Erkennungsverfahren der inneren Holzmerkmale von Kastanie, Eiche und Robinie werden Referenzmessungen an präparierten Stammscheiben sowohl am CT, als auch unter einem Mikroskop durchgeführt. Diese Referenzmessungen dienen der Bestimmung allgemeiner Charakteristiken der jeweiligen Holzmerkmale und regelmäßiger Muster im CT-Bild. Bei der Analyse der Muster wird dabei der Fokus auf die Grenzschichten zwischen den Holzmerkmalen gelegt.
Basierend auf diesen Untersuchungen werden geeignete Algorithmen zur Erkennung der einzelnen Holzmerkmale entwickelt. Diese werden anschließend an den CT-Bildern der gescannten Stammscheiben getestet, um Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Verfahren zu bestimmen.
In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Arbeitsschritte der Referenzmessungen detailliert beschrieben sowie die entwickelten Algorithmen dokumentiert.

2.2.1. Material

Kastanie: 32 Stämme aus dem Staatswald Lautenbach (Sendelbacher Fahrweg). Die Entnahme erfolgte im Sinne eines Lichtungshiebs. BHD 21 – 39 cm
Eiche:, 23 Stämme, Gemeindewald Rheinhausen, BHD 21 – 33 cm
Robinie: 16 Stämme, Gemeindewald Sasbach, geschätzt 40 Jahre, BHD 24-30 cm

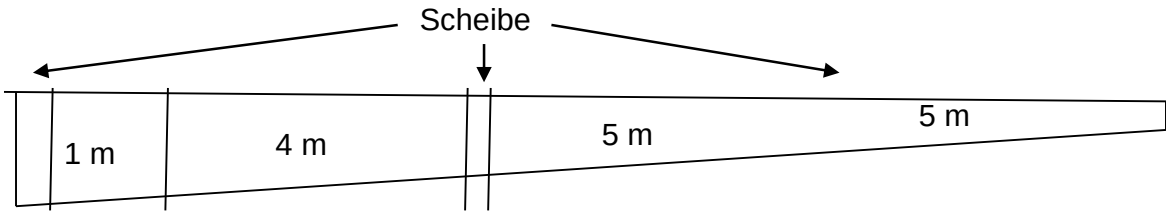

Abb. 8: Einteilung der Probestämme

Jeder Stamm wurde entsprechend dem in **Abb. 8** in Abschnitte und Probescheiben für weiterführende Untersuchungen zur Variation der Dichte im Stammquerschnitt in verschiedenen Stammhöhen entnommen. Die Scheiben wurde nach dem Scannen entnommen, so dass eine direkte Validierung zwischen CT-Wert und manueller Referenzmessung für die Holzdichte hergestellt werden kann.
Insgesamt wurden 57 Abschnitte Kastanie, 47 Eichenabschnitte und 19 Abschnitte Robinie ausgeformt, sowie 48 Scheiben Robinie, 69 Scheiben Eiche, und 96 Scheiben Kastanie.
Nach dem Scan wurden für die Entwicklung von Verbindungsmitteln oberhalb des BHD 1m Rollen entnommen als Testmaterial für Auszugsversuche.

2.2.2. Referenzmessung Rindenstärke

Zur Herleitung des Ansatzes für die Bilderkennung sowie zur Überprüfung der Genauigkeit der Ergebnisse des Erkennungsalgorithmus wurden Referenzmessungen an speziell präparierten Stammscheiben der drei Baumarten durchgeführt. Dazu wurden Grenzen zwischen Rinde und Splintholz sowie Splint und Kernholz entlang von eindeutig auf den Stammscheiben und im CT-Bild identifizierbaren Linien eingemessen. Dies ermöglichte zum einen die Zuordnung der einzelnen Voxel entlang der identifizierten Linie zu den jeweiligen Holzmerkmalen als auch andersherum die Überprüfung der Ergebnissen der Bilderkennung.
Die mikroskopischen Messungen an den Stammscheiben fanden unter einem Mikroskop mit Digitalpositiometer statt. Zur Verknüpfung der mikroskopischen Messungen mit den CT-Bilder wurden mit Hilfe der Software ImageJ der Ausgangspunkt, Winkel und Länge der am Mikroskop eingemessenen Linien auf dem CT-Bild bestimmt. Mit Hilfe dieser Variablen können den an den Stammscheiben identifizierten Grenzpunkten eindeutige Koordinaten im CT-Bild zugewiesen werden. Zudem werden die Voxelwerte entlang der gemessenen Linien gespeichert. Dies ermöglicht eine Untersuchung der Verteilung der Dichtewerte innerhalb der unterschiedlichen Holzmerkmale.
Zur Überprüfung der Genauigkeit der Ergebnisse der Erkennungsalgorithmen werden die in ImageJ identifizierten Messstrecken mit den Ergebnissen kombiniert. Die sich dabei ergebenden Abstände von den Messausgangspunkten zu den gefundenen Grenzen entlang der Messstrecke werden dann mit den Messergebnissen entlang der Messstrecken unter dem Mikroskop verglichen.
Je Baumart wurden sieben Stammscheiben von ca 10 cm Stärke unterschiedlichen Durchmessers ausgewählt. Die Stammscheiben werden in unterschiedlichen Höhen zwischen Stock und Zopf an mehreren Bäumen entnommen.
Die Stammscheiben stammten von Bäumen, welche im Rahmen des Projektes ausgewählt wurden.
Die Stammscheiben wurden eindeutig markiert und nummeriert. Als Referenzstrecken wurden zwei im rechten Winkel zueinander liegende ca. 1cm tiefe Schnitte mit einer Motorsäge markiert, die sich in der Markröhre kreuzten.
Durch die Einschnitte wurden die Stammscheibe in vier Quadranten eingeteilt. Jeweils ein Quadrant wurde mit einem Nagel, welcher in radialer Richtung in die Rinde getrieben wird, markiert. Die Position des Nagels diente zur eindeutigen Orientierung der Stammscheibe unter dem Mikroskop und am CT-Bild (**Abb. 9**). Die Stammscheiben wurden im Scanner CT.Log bei derselben Einstellung gescannt wie die gesamten Abschnitte, die Rekonstruktion erfolgte auf 768*768 Pixel (**Abb. 10**).

Abb. 9: Präparierte Stammscheibe, Baumart Kastanie, Quadrant mit Nagel rechts oben

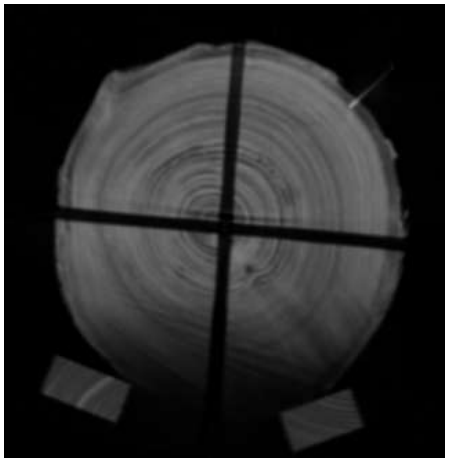

Abb. 10: Eines der vorderen Slices einer Kastanien Stammscheibe. Deutlich erkennbar, die Einschnitte der Motorsäge und der Nagel oben rechts.

Die Längenmessung der Referenzstrecken in den rekonstruierten CT-Bildern erfolgte für alle Scheiben in ImageJ.

Da die beiden verwendeten Softwarepakete ImageJ (Einzelmessungen) und die Software CT-Spec (automatisierte Erkennung) unterschiedliche Koordinatensysteme für die Bilddarstellung verwenden musste zusätzlich noch eine Transformation der Koordinatensysteme in die Verrechnung eingebaut werden.
m die Ergebnisse aus der Bilderkennung in CT-Spec mit den Referenzmessungen vergleichen zu können, müssen diese im selben Koordinaten System vorliegen.
Dazu werden die Koordinaten wie folgt umgerechnet (ImageJ nach CT-Spec):

x_{ct} = xi - 384 (*1,107mm)
y_{ct} = 384 (*1,107mm) – y_i

2.2.2.1 Referenzmessung am Mikroskop

Die Stammscheiben wurden mit einem Mikroskop Leica MZ 6 mit integrierten Videomodul Leica IC A und Digitalpositiometer Biritz-Hatzl Typ 2 vermessen (Abb. **11**). Für eine exaktere Messung wurde die Oberfläche jeder Scheibe mit einer Bandschleifmaschine sauber geschliffen.
Je Stammscheibe finden acht Messungen statt, jeweils zwei Messungen pro Radius direkt oberhalb und unterhalb der Einschnitte auf der Vorderseite der Stammscheibe (Abb. **12**).
Ausgangspunkt ist die oberer linke Ecke des Schnittpunktes der zwei Einschnittskerben für die erste Messung (m1) und die untere rechte Ecke des Schnittpunktes der zwei Einschnittskerben für die zweite Messung (m2).
Gemessen wurde in Millimetern mit einer Nachkommastelle der Abstand des Ausgangspunkts zur inneren Grenze

- des Splintholzes,
- ggf. der Lücke zwischen Bast und Splintholz,
- des Bastes (inklusive möglicher Hohlräume),
- der Borke und
- der Außenkante der Stammscheibe (gesamt Länge der Messstrecke).

Abb. 11: Versuchsaufbau einer Mikroskopmessung mit Digitalpositiometer und integrierten Videomodul. Präparierte Eichenstammscheibe mit Nagel oben rechts.

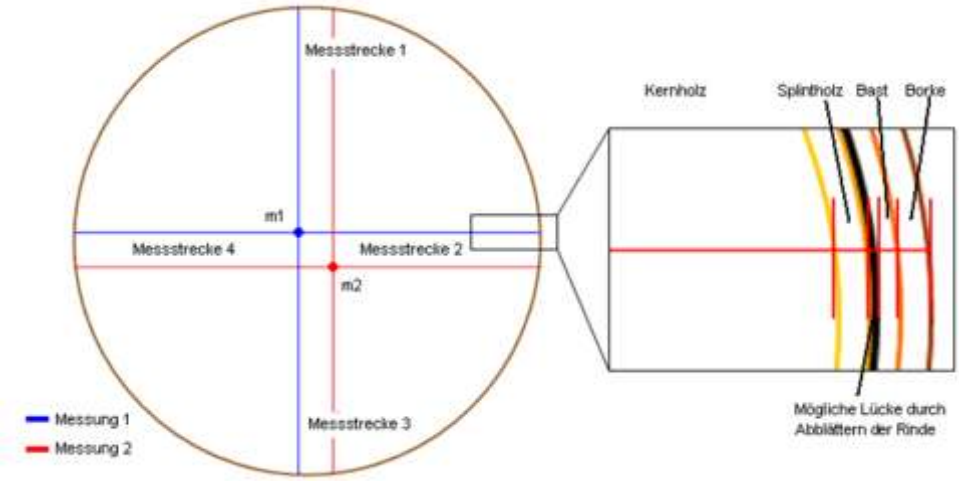

Abb. 12: Mikroskopmessungen. Gemessen wird vom Ausgangspunkt m1 für Messung 1 und vom Ausgangspunkt m2 für Messung 2

2.2.3. Erkennungsverfahren innerer Holzmerkmale in CT-SPEC

Die Entwicklung der Erkennungsalgorithmen für die Holz-Rindengrenze und die Splint-Kernholzgrenze bei Kastanie, Eiche und Robinie basiert auf klassischen Verfahren der Bildanalyse. Diese kombinieren Histogramm- und Kurvenanalysen zur statistischen Analyse der Grauwertverteilung im Gesamtbild. Der Algorithmus kombiniert in der Analyse Informationen aus Längs- und im Querschnitt, beziehungsweise transformiert die Daten für die Analyse (Polartransformation, Zylindrischer Schnitt, Mantelflächen).
Die verschiedenen Ableitungen und Rechenoperationen verwenden Konstanten in unterschiedlicher Weise. Diese Parameter wurden durch Iterationen gegen die Referenzmessungen validiert, um für die Bestimmung der Rindenstärke der drei Holzarten die jeweils genaueste Erkennung zu erreichen. Die für die automatisierte Erkennung genutzte Parametersetzung der jeweiligen Konstanten ergab sich aus der kleinsten Standardabweichung, den beste arithmetischen Mittel und dem besten Median der Abweichung zur Referenzmessung.

2.2.4. Auswertung des Stammmaterials

Zur Ermittlung der charakteristischen Dichte von Rinde, Splint und Kernholz wurden Histogrammanalysen für die jeweiligen Holzmerkmale durchgeführt. Dazu werden die Grauwerte der Pixel (entspricht der Dichte Holzes im frischen Zustand zum Zeitpunkt des Scans), welche innerhalb der Grenzen des jeweiligen Merkmals liegen, in Klassen mit konstanter Breite aufgeteilt und deren Häufigkeit je Klasse über alle Slices und Abschnitte je Baumart gezählt. Die ermittelte Dichte wird im zweiten Projektteil weiter analysiert und mit der Holzfeuchtigkeit und der Holzdichte im darrtrockenen Zustand vergleichen.

2.3. ERGEBNISSE

2.3.1. Erkennungsverfahren

Die Herleitung der Erkennungsverfahren der inneren Holzmerkmale von Kastanie, Eiche und Robinie beruht auf einer Analyse der Messungen entlang der Messstrecken der präparierten Stammscheiben.
Im folgenden Abschnitt werden für jede Baumart die Messergebnisse vorgestellt und die daraus abgeleiteten Erkennungsverfahren erläutert. Die Erkennungsverfahren wurden in einem Entwicklungszweig der Software CT-Pro namens „CT-Spec“ in der Programmiersprache C++ programmiert und zur automatisierten Erkennung der Rindengrenzen für die einzelnen Holzarten verwendet.

2.3.1.1 Erkennungsverfahren Kastanie

Für einen ersten Vergleich der Dichtewerte der unterschiedlichen Holzmerkmale wurden Kastengrafiken für jedes Merkmale erstellt. Dazu wurden die auf der Messstrecke liegenden Pixel entsprechend ihrer Distanz zum Messausgangspunkt einem Holzmerkmal zugeordnet und die Häufigkeit der einzelnen Grauwerte gezählt (Abb. **13**). Aus dem Vergleich der Kastengrafiken wird ersichtlich, dass das Kernholz der Kastanie die höchste Dichte aufweist, gefolgt von Splintholz, Bast und der Borke. Die bei einigen Messstrecken auftretende Lücke zwischen Rinde und Holzkörper weist Grauwerte auf, die im Variationsbereich der Borke liegen. Dies ist durch Mischpixel zu erklären, die sich aus den sehr niedrigen Werten der Luft und den höheren Werten von Bast und Splintholz ergeben. Zwar unterscheiden sich die einzelnen Kastengrafiken signifikant, jedoch überlappen sie sich in weiten Teilen, so dass eine klare Abgrenzung der Kompartimente über einen Schwellwert allein nicht möglich ist.

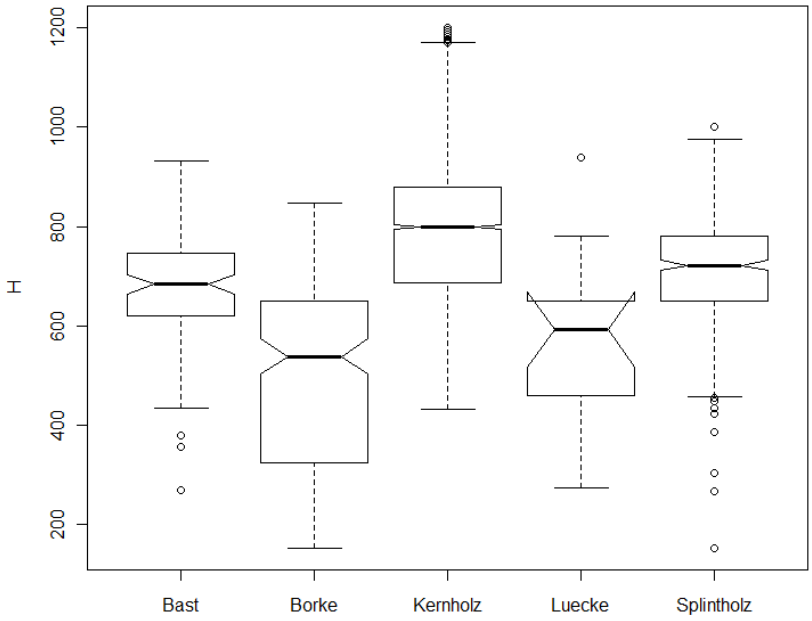

Abb. 13: Boxplots der Dichtevariation von Holz und Rinde bei der Kastanie. „Lücke“ bezeichnet den Spalt zwischen Bast und Splint bei sich ablösender Rinde (Kompartimente in alphabetischer Folge). Die Boxplots präsentieren den Mittelwert, unteres und oberes Quartil, sowie Extrema und Ausreißer)

Wird der Verlauf der Dichte entlang der Messstrecke untersucht, so fällt eine charakteristische Zeichnung in der Abfolge der Gewebe von Rinde zum Splintholz bei der Kastanie auf.

Von außen kommend steigt die Dichte anfangs stark an, um dann im Kambium-nahen Bereich zu kumulieren und anschließend im Bereich des Splintholzes deutlich abzusinken. Erst in der Verkernungszone steigt die Dichte wieder an (**Abb. 14**, Abb. **15**). Das Kernholz selbst hat keine homogene Dichte. Neben sich abzeichnenden zyklischen Schwankungen radial zu den Jahrringgrenzen ist eine allgemein ansteigende Tendenz der Holzdichte vom Mark zur Kernholzgrenze zu beobachten. Lebende Äste haben eine höhere Dichte, Totäste eine niedrigere (**Abb. 14**).

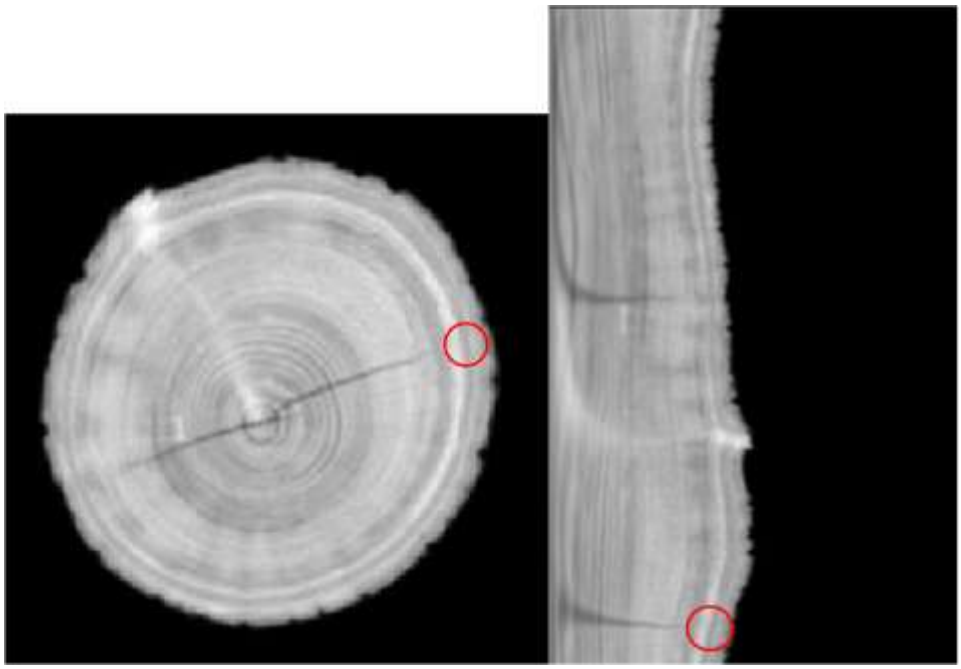

Abb. 14: Querschnitt und Querschnitt in Polarprojektion einer Kastanienstammscheibe. Der rote Kreis hebt einen Bereich mit Rinde, Splint- und Kernholz hervor. Der dunkle Streifen mittig im Kreis wurde als das Splintholz identifiziert.

Erkennung der Rinde-Splintholz-Grenze

Die charakteristische Zeichnung im Verlauf von Rinde und Splintholz lässt sich als quadratische Funktion (polynomische Funktion 4. Grades) darstellen (**Abb. 15**). Die Grenzpunkte zwischen Rinde und Splintholz sowie zwischen Splintholz und Kernholz können mit Hilfe von Extrem- und Wendepunkten dieser Funktion beschrieben werden. Die Formel der Gleichung wird unter Verwendung von Ausgleichungsrechnungen durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Die in die Berechnung eingehenden Werte sind dabei die äußeren Werte der Messradien.

Da die Stärke von Rinde und Splintholz nicht bekannt ist, diese bei der Kastanie in den untersuchten Durchmesserklassen jedoch der Erfahrung nach 25 mm nicht überschreitet, werden pro Messradius jeweils elf Ausgleichsrechnungen mit ansteigender Zahl von Eingangswerten durchgeführt, wobei die maximale Anzahl der Eingangswerte 25 nicht überschritten wird. Für erste Tests wurden die Eingangswerte auf 15 bis 25 festgelegt. Bei einer späteren Optimierung wurden als beste Eingangswerte 12 bis 22 für die Rinden-Splintholzgrenze und 16 bis 26 für die Splintholz-Kernholzgrenze ermittelt (0). Für jede Ausgleichsrechnung wird die mittlere quadratische Abweichung der Kurve zu den Messpunkten berechnet und schließlich von den elf Kurven diejenige mit der kleinsten Fehlerquadraten gewählt. Anschließend wird für die ausgewählte Kurve die erste Ableitung für die Bestimmung der Extrempunkte, sowie die zweite Ableitung zur Bestimmung der Wendepunkte ermittelt (Abb. **15**).

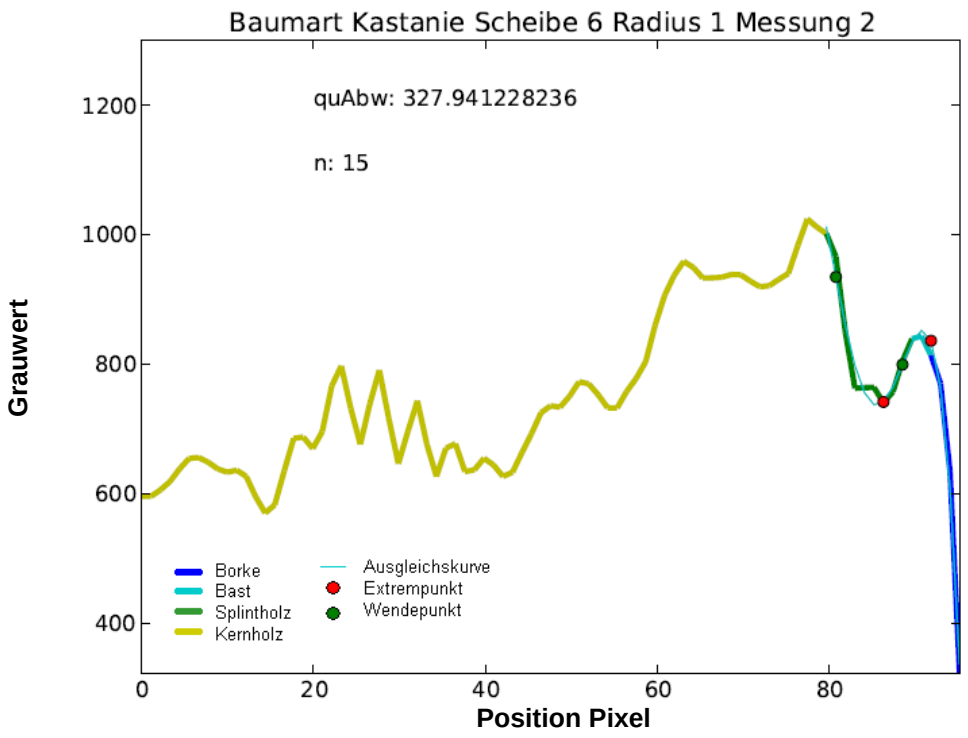

Abb. 15: Dichtevariation entlang Messstrecke einer Kastanienstammscheibe mit quadratischer Ausgleichskurve, berechnet mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate und 15 Eingangswerten.

Wie in Abb. **15** ersichtlich, liegt die Grenze zwischen Bast und Splintholz nahe des äußeren Maximums der quadratischen Funktion, die Grenze zwischen Splint- und Kernholz nahe dem Wendepunkt links vom inneren Minimum.

Wie auch bei den Eingangswerten wurde die tatsächliche Positionierung anfänglich auf das äußere Maximum sowie 1,5 mm innerhalb des inneren Wendepunktes festgelegt. Bei einer späteren Optimierung wurden die Grenzpunkte jeweils schrittweise um 0,2 mm nach links und rechts verschoben und die beste Übereinstimmung mit den Referenzmessungen am Mikroskop ermittelt.

Nicht für alle Messradien (Zeilen im Polarbild) ist es möglich, passende Kurven zu finden. Dies liegt überwiegend an fehlenden Kontrasten im Bild oder Ausnahmefälle wie auswachsenden Ästen und Rindenschäden (0).

Durch die inhomogenen Eigenschaften des Stamminneren lassen sich die Grenzen zwischen Rinde und Splint sowie Splint- und Kernholz nicht immer zuverlässig im CT-Bild identifizieren. Durch lokale Abweichungen der Dichte bzw. des Wassergehaltes können die Kontraste entlang einiger Messradien zu gering sein, so dass die Ausgleichungsrechnung keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern. In diesen Fällen kann keine passende quadratische Funktion gefunden werden. Für die Erkennung der Grenze zwischen Rinde und Splintholz wird in diesen Fällen kein Punkt gespeichert und die entstandene Lücke in einem zweiten Durchlauf nachträglich mittels der Prozedur einer „intelligenten Schere“ (MORTENSEN & BARRETT 1998) geschlossen. Hierbei werden die Grenzpunkte der entstandenen Lücke entlang markanter Kanten im Bild verbunden.

Da das Splintholz der Kastanie in der Regel nicht zwischen Jahrringen springt und somit dessen Stärke keine signifikanten Sprünge macht, wird in diesem Fall bei fehlenden Punkten die Lücke der Splintholz-Kernholzgrenze durch Interpolation geschlossen.

Ausnahmen

Die gesuchten Grenzpunkte können bei auftretenden Rindenablösungen und fehlender Rinde sowie auswachsenden Ästen nicht mit Hilfe von Ausgleichrechnungen erkannt werden, da in diesen Fällen die Grauwerte entlang der Messradien im Endbereich nicht die sonst so charakteristische Kurve aufweisen. Diese Ausnahmefälle müssen vor der eigentlichen Erkennung der Grenzen maskiert und mit gesonderten Ansätzen analysiert werden.

Erkennung von Rindenschäden

Rindenschäden treten immer wieder an den Stammabschnitten auf. Diese können am lebenden Baum oder nach der Fällung in Folge von mechanischen Einwirkungen beim Transport oder während Lagerung der Stämme entstanden sein.
In allen Fällen ist die Rinde nicht mehr mit dem Stamm verbunden, wenn nicht sogar vollkommen entfernt, so dass die äußere Grenze des Splintholzes mit der Außenkante des Stamms gleichzusetzen ist.
Durch das Fehlen der schützenden Rinde ist das freiliegende Holz anderen Bedingungen als unter der Rinde ausgesetzt. So ist unter anderem mit einem geringeren Wassergehalt auf Grund schnellerer Austrocknung zu rechnen, auch können Veränderungen der Holzstruktur auf Grund von eingedrungenen Schädlingen und/oder Abwehrreaktionen des Baumes auftreten. Da die zu erwartenden Veränderungen jedoch stark von dem Zeitpunkt und Art der Schädigung abhängen, die nicht aus der Momentaufnahme des CT-Bildes abgeleitet werden können, können keine allgemeinen Regeln für Veränderungen der Holzmerkmale bei Rindenschäden aufgestellt werden. Aus diesem Grund wurde von einer Differenzierung der Erkennung veränderter Holzeigenschaften abgesehen, und lediglich - wie auch bei der Verbindung der sicheren Grenzpunkte - die Splintholz- Kernholzgrenze für den Bereich der Rindenschädigung zwischen den letzten bekannten Grenzpunkten interpoliert.
Folglich sind für die Maskierung der Rindenschäden lediglich die Bereiche am Stamm zu identifizieren, an denen sich die Rinde ablöst oder vollkommen fehlt.

Maskierung von Rindenablösungen

Rindenablösungen lassen sich gut in Quer- sowie Längsschnitten von CT-Bildern identifizieren (Abb. **16**). Der Freiraum zwischen sich ablösender Rinde und dem Holzkörper ist eindeutig zu erkennen.
Zur Maskierung des entsprechenden Bereichs wird auf den Messradien im Längsschnitt von innen her kommend der erste Punkt unterhalb eines gesetzten Schwellwertes des Grauwerts für Holz gesucht. Anschließend wird getestet, ob im weiter außen liegenden Bereich Werte oberhalb des gesetzten Schwellwertes auftreten. Ist dies der Fall, wird von einer Rindenablösung ausgegangen und in einer Maske die entsprechenden Koordinaten der Rindenablösung gespeichert.

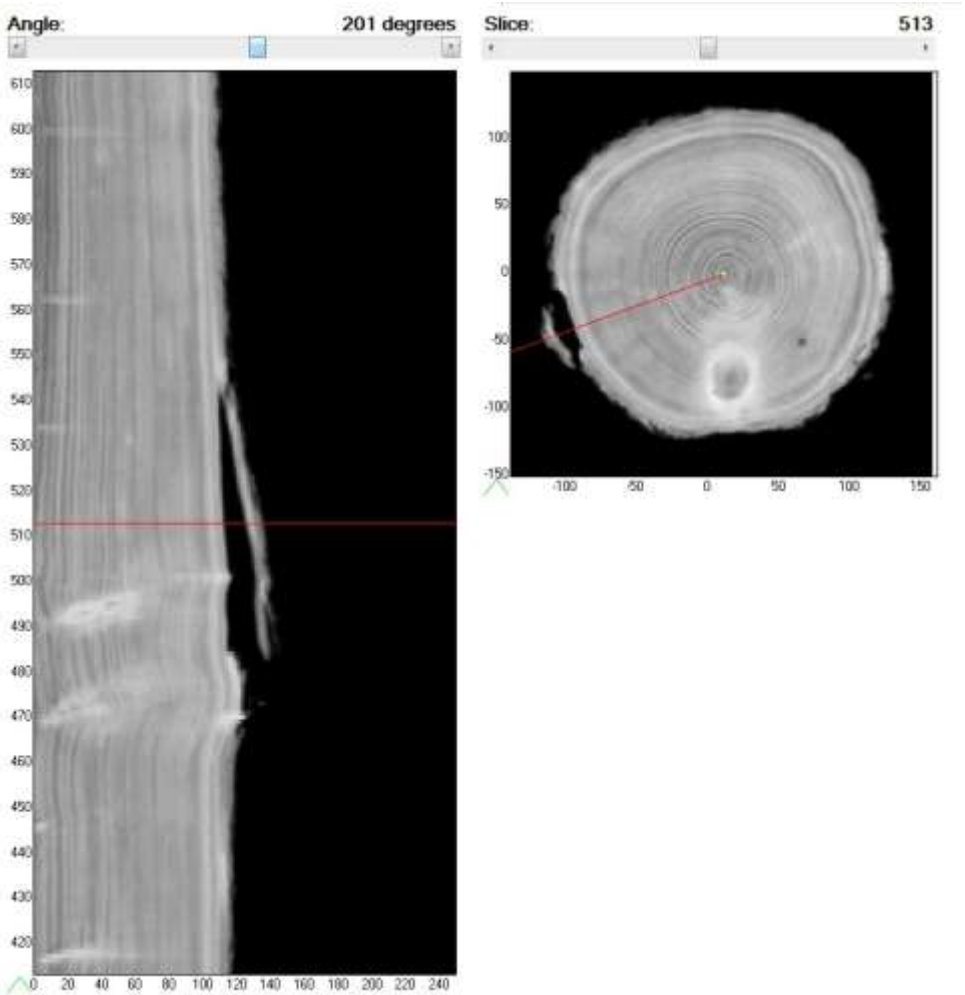

Abb. 16: Rindenablösung an einer Kastanie im Längs- (links) und Querschnitt (rechts). Die rote Linie ist jeweils der Schnittverlauf im anderen Bild.

Maskierung fehlender Rindenstücke

Fehlende Rinde kann im Längsschnitt durch Sprünge im Verlauf der Stammaußenseite erkannt werden. Dafür wird der Verlauf der Stammaußenseite als Kurve mit relativ konstanter Steigung betrachtet. An den Stellen an denen die Rinde fehlt, sind sprunghafte Änderungen der Steigung zu beobachten. Ähnlich sprunghafte Änderungen der Steigung treten auf, wenn die intakte Rinde wieder erkennbar wird. In diesem Fall zeigt die Steigung jedoch das gegenläufige Vorzeichen.

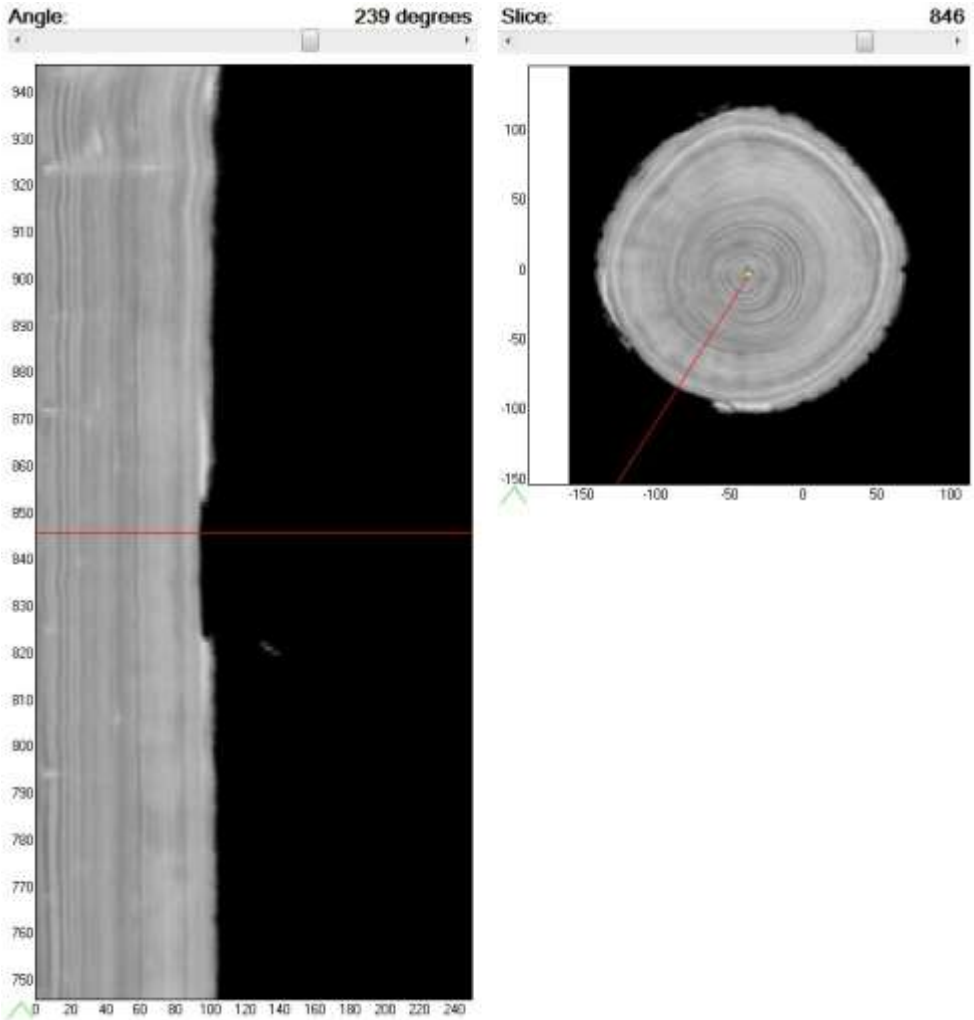

Abb. 17: Rindenverletzung an einer Kastanie im Längs- (links) und Querschnitt (recht). Die rote Linie ist jeweils der Schnittverlauf im anderen Bild.

Erkennung auswachsender Äste

Auswachsende Äste werden in der Regel abgetrennt, bevor die Stammabschnitte gescannt werden. Am Stammabschnitt bleiben jedoch die Verformungen durch den Astansatz und eine markante gerade Schnittfläche. Entlang dieser Schnittfläche sind erwartungsgemäß weder Splintholz noch Rinde zu finden, sodass hier beide Grenzen mit der Außengrenze des Stammabschnittes gleichzusetzen sind.

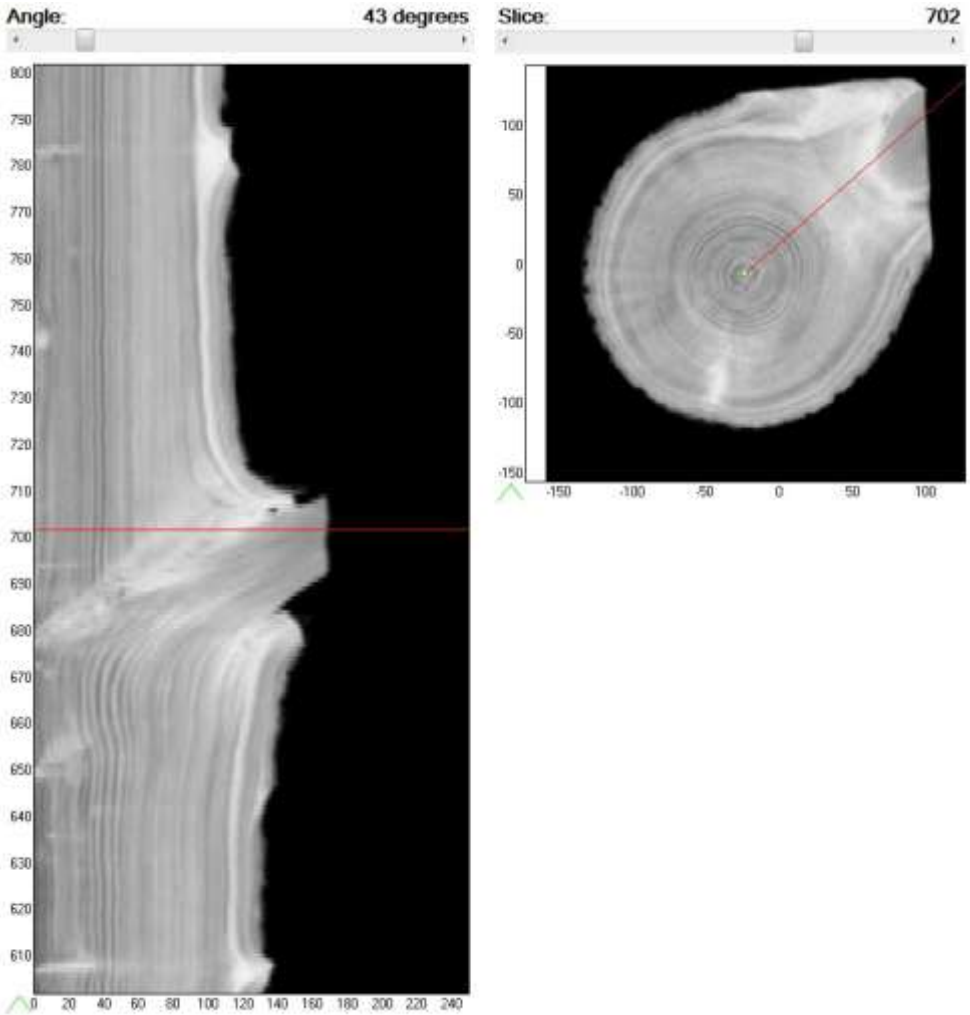

Abb. 18: Auswachsender Ast an einer Kastanie im Längs- (links) und Querschnitt (rechts). Die rote Linie ist jeweils der Schnittverlauf im anderen Bild.

Die Maskierung des auswachsenden Astes erfolgt wieder am Längsschnitt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die übereinander liegenden Radien sich nur unerheblich in ihrer Länge unterscheiden. Auswachsende Äste hingegen ragen im Längsschnitt deutlich heraus. Die hier gemessenen Radien sind deutlich länger als die mittlere Radienlänge. Ist lokal eine solche Auswölbung zu finden, wird dieser Bereich als auswachsender Ast identifiziert.

Optimierung der Parameter

Die Optimierung der Parameter ergab nur geringe Unterschiede der Ergebnisse gegenüber der ersten Versuchsreihe, dennoch konnten sowohl Streuung als auch Mittelwerte und Median verbessert werden. Deutlich wurde, dass die optimalen Parametereinstellung zur Erkennung der Rinde, nicht dieselben sind, wie die für die Erkennung des Kernholzes.
Für die Auswertung wurde das arithmetische Mittel, der Median und die Standartabweichung der Abweichung der Messergebnisse zur Referenzmessung berechnet. Je Kennzahl wurde anschließend ein Ranking erstellt, bei dem die besten Werte jeweils die kleinsten Ränge erhielten. Für Mittel und Median wurden dafür die absoluten Werte herangezogen.

Tab. **9** und Abb. **19** zeigen einen Ausschnitt der Ergebnisse der Parameter Optimierung für die Erkennung der Rinde der Kastanie. Aufgelistet sind die Ergebnisse mit der kleinsten Standartabweichung, dem besten

arithmetischen Mittels und dem besten Median, sowie das beste gemeinsame Ergebnisse des arithmetischen Mittels und der Standardabweichung, des Medians und der Standardabweichung, sowie den jeweils besten gemeinsamen Ergebnis aller drei Werte.
Die Parameter Einstellung mit der kleinsten Standartabweichung, dem besten Ergebnis für Median und Standardabweichung sowie besten Gesamtergebnis wurden erzielt bei 12 – 22 Eingangswerten, einer Verschiebung von -0.6 mm des Grenzpunktes vom ersten Maximum der Kurve und einen Schwellwert für Luft von 160.
Die Herabsetzung des Schwellwertes für Luft bei sonst gleichen Einstellungen erbrachte ein fast vergleichbar gutes Ergebnis mit einem besseren Mittelwert.

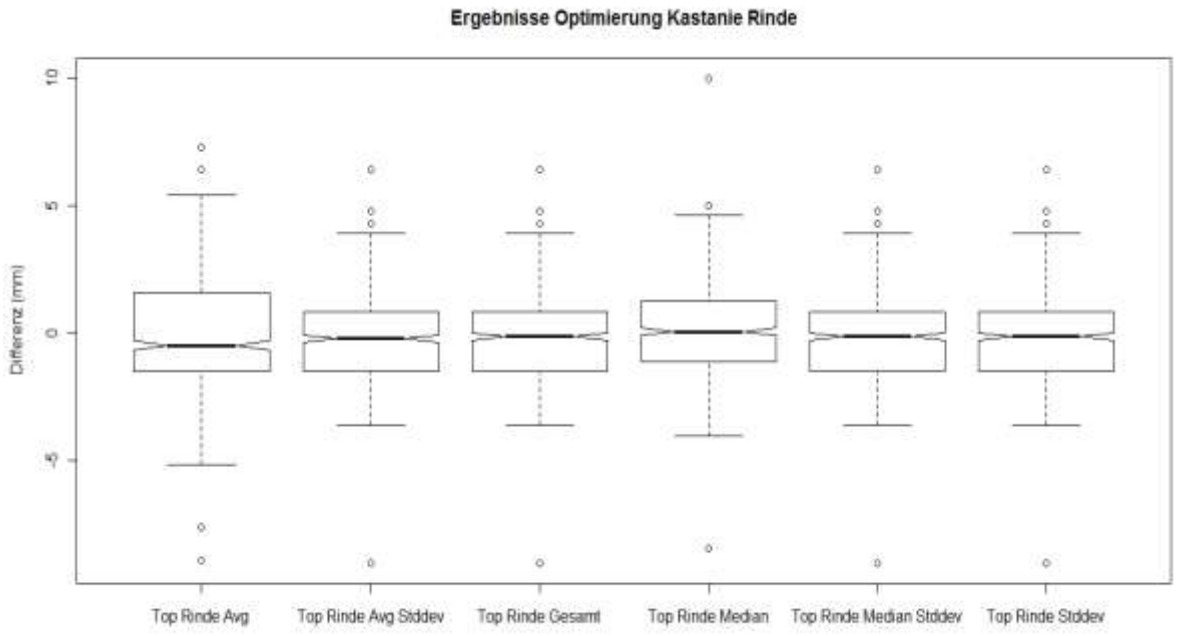

Abb. 19: Boxplots der besten Ergebnisse der Optimierung für die Rindenerkennung bei Kastanie

Tab. 9: Parameter für die besten Ergebnisse der Optimierung für die Rindenerkennung bei Kastanie

Ergebnis	Anzahl Sample min	Anzahl Sample max	Offset Rinde	Luft	Mittel	Median	StAw	Min	Max	Std Rang	Mittel Rang	Median Rang	Summe Rang
Top Rinde gesamt	12	22	-0.6	160	-0.076	-0.152	2.363	-9.035	6.409	1	40	62	103
Top Rinde mittl. Std	12	22	-0.6	130	-0.031	-0.277	2.385	-9.035	6.409	8	11	166	19
Top Rinde median Std	12	22	-0.6	160	-0.076	-0.152	2.363	-9.035	6.409	1	40	62	63
Top Rinde Std	12	22	-0.6	160	-0.076	-0.152	2.363	-9.035	6.409	1	40	62	1
Top Rinde Mittel	14	24	-0.4	120	0.003	-0.492	2.966	-8.880	7.295	443	1	283	1
Top Rinde Median	20	30	-0.4	170	0.270	-0.002	2.648	-8.433	10.021	106	140	1	1

Die besten Ergebnisse zur Erkennung des Kernholzes wurden mit einer höheren Anzahl von Eingangswerten erzielt als bei der Erkennung der Rinde. Die optimale Anzahl lag bei 16 – 26 Werten. Auch lag der Schwellwert für Luft mit 200 höher als bei der Rinde. Der Grenzpunkt wurde dabei -0.8 mm vom inneren

Wendepunkt verschoben. Eine geringfügig weitere Verschiebung des Punktes um -1mm erbrachte einen leicht verbesserten Mittelwert bei gleichzeitiger leichten Verschlechterung des Median.

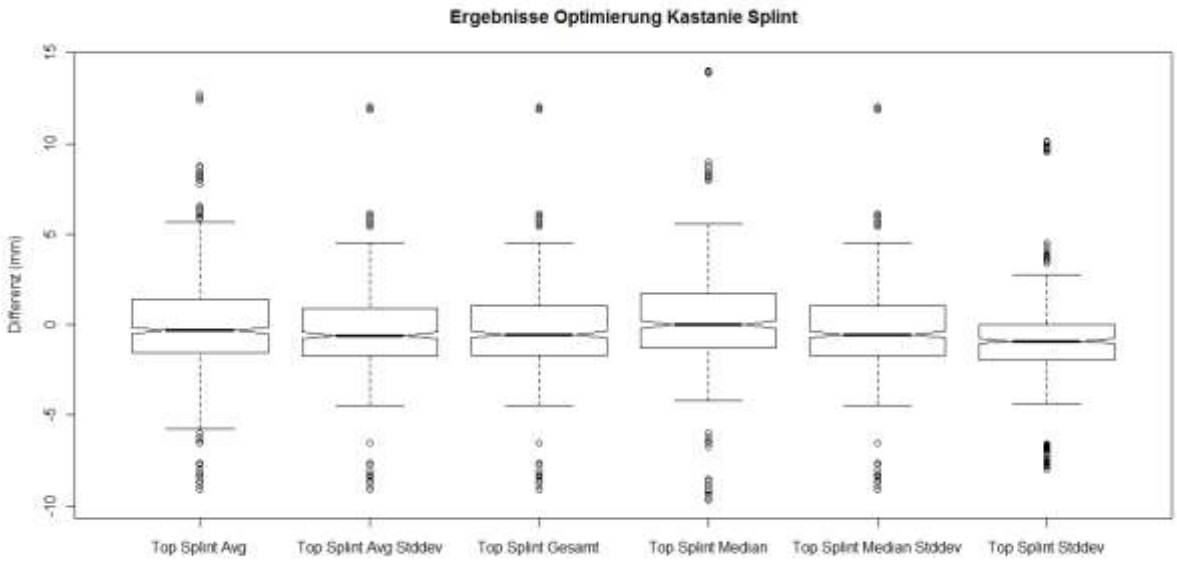

Abb. 20: Boxplots der besten Ergebnisse der Optimierung für die Erkennung der Splintgrenz bei Kastanie

Tab. 10: Parameter für die besten Ergebnisse der Optimierung für die Splintholz-Kernholzgrenze bei Kastanie

Ergebnis	Anzahl Sample min	Anzahl Sample max	Offset Rinde	Luft	Mittel	Median	StAw	Min	Max	Std Rang	Mittel Rang	Median Rang	Summe Rang
Top Splint gesamt	16	26	-0.8	200	-0.345	-0.543	2.707	-9.111	12.046	87	41	81	209
Top Splint mittl. Std	16	26	-1	200	-0.384	-0.588	2.686	-9.111	12.046	77	49	95	126
Top Splint Median Std	16	26	-0.8	200	-0.345	-0.543	2.707	-9.111	12.046	87	41	81	168
Top Splint Std	18	28	-1	200	-0.879	-0.910	2.547	-7.962	10.153	1	214	224	1
Top Splint Mittel	16	26	-1	190	-0.020	-0.325	2.790	-9.111	12.748	146	1	72	1
Top Splint Median	16	26	-0.8	150	0.138	-0.001	2.824	-9.714	14.053	161	11	1	1

2.3.1.2 Erkennungsverfahren Eiche

Zur Erkennung der inneren Holzmerkmale der Eiche wurde anfänglich derselbe Ansatz verfolgt wie für die Kastanie. Die Betrachtung der Histogrammwerte ergab, dass das Kernholz eine deutlich höhere Dichte besitzt als Splintholz und Rinde, jedoch traten viele Ausreißer mit niedriger Dichte auf, so dass auch hier keine klare Trennung mittels Schwellwerten getroffen werden kann (Abb. **21**).

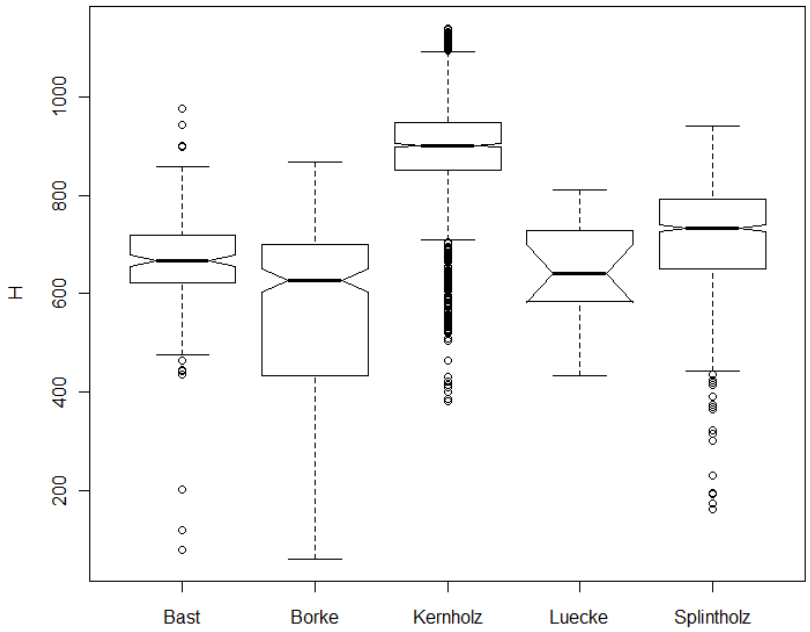

Abb. 21: Variation der Dichte der einzelnen Kompartimente im Übergangsbereich von Holz zu Rinde bei der Eiche. „Lücke“ bezeichnet den Spalt zwischen Bast und Splint bei sich ablösender Rinde. (Kompartimente in alphabetischer Folge). Die Boxplots präsentieren den Mittelwert, unteres und oberes Quartil, sowie Extrema und Ausreisser)

Bei der Betrachtung der Dichtewerte entlang der Messstrecke wurde ein markanter Verlauf im Kambium-nahen Bereich erkennbar. Nach einem ersten Anstieg der Dichte im Bereich der Rinde, fällt die Dichte im Bereich des Kambiums ab, um dann im Verlauf des Splintholzes auf mittlerem Niveau zu verbleiben. Im Bereich des Kernholzes steigt die Kurve erneut an, für diesen Fall konnte jedoch kein allgemeines Muster erkannt werden (Abb. **22**).

Erkennung der Rinde-Splintholz Grenze

Ähnlich wie bei der Kastanie, lässt sich die Rindengrenze bei der Eiche entlang der Radien mit Hilfe von Ausgleichsfunktionen finden. Auch für die Eiche sind die Eingangswerte die äußeren Werte der Messradien. Da die Rinde der Eiche jedoch dicker wird als die der Kastanie, ist eine größere Anzahl von Eingangswerten erforderlich. Beste Ergebnisse wurden mit einer Anzahl zwischen 24 und 29 Werten erzielt.
Anders als bei der Kastanie wird jedoch nach einer kubischen Funktion gesucht (Polynomische Funktion dritter Ordnung). Der Grenzpunkt zwischen Rinde und Splintholz liegt etwas innerhalb des Minimums (zweite Extrempunkt von außen). Als bester Wert wurde 1,3mm ermittelt.
Wie bei der Kastanie, wurden Ausgleichsfunktionen mit schlechtem Fit nicht aufgenommen und die dadurch entstehenden Lücken mittels intelligenter Schere geschlossen. Für die Rindenerkennung der Eiche gelten ebenfalls die gleichen Ausnahmeregeln wie für die Kastanie. Rindenablösungen, Rindenschäden und auswachsende Äste werden mit der gleichen Methode erkannt.

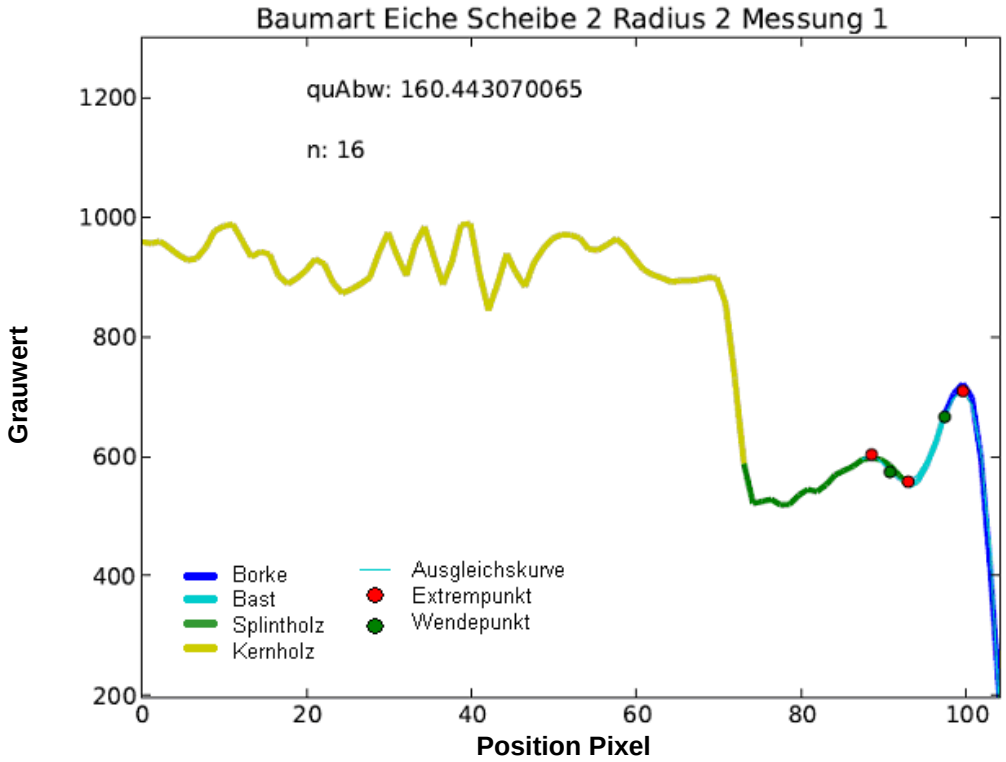

Abb. 22: Grauwerte entlang der Messstrecke einer Eichenstammscheibe mit Ausgleichskurve Polynomfunktion 3. Ordnung) berechnet mit der Methode der kleinsten Quadrate.

Erkennung des Kernholzes

Da der Verlauf der Dichte zwischen Splint- und Kernholz nicht mittels einer bestimmten Kurvenform beschrieben werden kann, jedoch eine tendenziell höhere Dichte des Kernholzes erkennbar ist, wurde auf ein einfaches Klassifizierungsverfahren, das Graph-Cut-Verfahren zurückgegriffen. Bei diesem Verfahren wird das zu klassifizieren Bild in zwei zusammenhängende Bereiche (Kernholz, kein Kernholz) aufgeteilt. Eingangswerte sind dabei Kontrast- und Farbstatistiken.
Für die Klassifizierung wurden vier Klassen definiert:

- sicher Kernholz
- wahrscheinlich Kernholz
- wahrscheinlich kein Kernholz
- sicher kein Kernholz

Die Grenze der zwei endgültigen Bereiche liegt dabei innerhalb der Grenzen der Klassen wahrscheinlich Kernholzes und wahrscheinlich kein Kernholz.
Anhand der Referenzmessung konnte eine vorläufige Abschätzung für die Klassenzuordnung abgeleitet werden. Der Durchmesser des Kernholzes der Referenzmessungen nahm 65 bis 85 % des Gesamtdurchmessers ein. Durch die Optimierung wurde die beste Klassenzuordnung gefunden. Demnach gilt für Werte, die im Bereich $r < 0{,}67*R$ (R=0,5 Gesamtdurchmesser) liegen, dass diese sicher dem Kernholz zugeordnet werden können. Für die Werte außerhalb dieses Bereichs $r \geq 0{,}67*R$ besteht eine abnehmende Wahrscheinlichkeit, dass es sich im Kernholz handelt. Werte, die zwischen 67 bis 70 % des Radius liegen sind wahrscheinlich Kernholz, Werte außerhalb wahrscheinlich kein Kernholz (Abb. **23**). Die äußeren 21 mm sind sicher kein Kernholz.

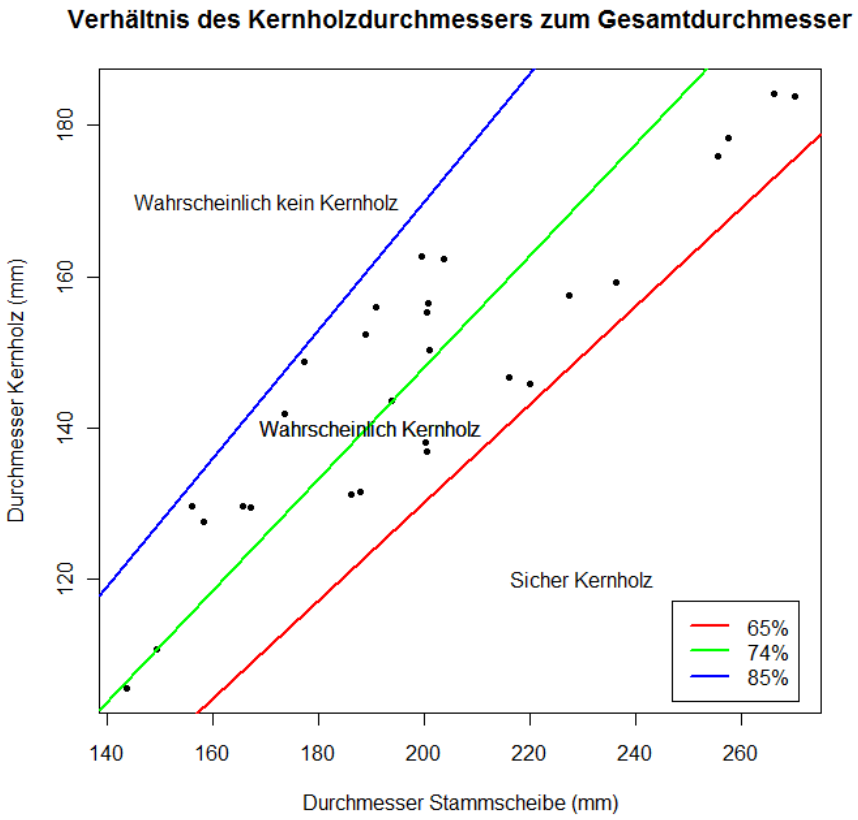

Abb. 23: Durchmesser des Kernholzes der Eichenstammscheiben über dem Gesamtdurchmesser der Eichenstammscheiben.

Die Klassifizierung mittels Graph-Cut-Verfahren liefert in der Regel recht sichere Ergebnisse, jedoch können stellenweise auftretende Unregelmäßigkeiten wie eingewachsene Äste oder Markstrahlen, zu Fehlern führen. In diesen Fällen wandert die Kernholzgrenze mit den Ästen oder Markstrahlen nach außen (dieser Zuordnungsfehler könnte bei einer Weiterentwicklung des Algorithmus durch Einbeziehung weiterer Klassifizierungsregeln noch verbessert werden können).

Optimierung der Parameter

Wie auch bei der Kastanie ergab die Optimierung der Parameter nur geringe Unterschiede der Ergebnisse gegenüber der ersten Versuchsreihe. Aber auch für die Eiche konnten sowohl Streuung als auch Mittelwerte und Median der Abweichungen von der Referenz minimiert werden.

Wie für die Kastanie, wurde für die Auswertung das arithmetische Mittel, der Median und die Standardabweichung der Abweichung der Messergebnisse zur Referenzmessung berechnet. Je Kennzahl wurde anschließend ein Ranking erstellt, bei dem die besten Werte jeweils die kleinsten Ränge erhielten. Für Mittelwert und Median wurden dafür die absoluten Werte herangezogen.

Tab. **11** und Abb. **24** zeigen einen Ausschnitt der Ergebnisse der Parameter Optimierung für die Erkennung der Rinde der Eiche. Aufgelistet sind die Ergebnisse mit der kleinsten Standardabweichung, dem besten arithmetischen Mittels und dem besten Median, sowie das beste gemeinsame Ergebnisse des arithmetischen Mittels und der Standardabweichung, des Medianes und der Standardabweichung, sowie den jeweils besten gemeinsamen Ergebnis aller drei Werte.

Die Parametereinstellung mit dem besten Ergebnis für Mittelwert und Standardabweichung sowie die geringsten Abweichungen in der Rindenstärke wurden erzielt mit 24 – 29 Eingangswerten, einer Verschiebung von -1,3 mm des Grenzpunktes vom ersten Minimum der Kurve und einem Schwellwert für Luft von 160 bzw. 170.

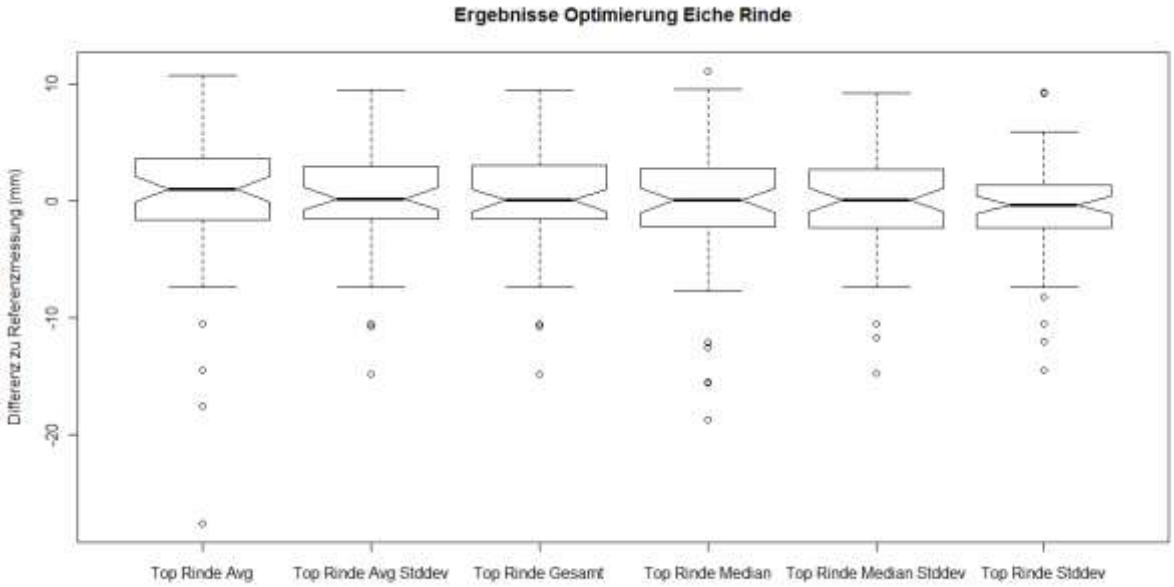

Abb. 24: Variation der Differenz zur Referenzmessung der Ergebnisse der Optimierung für die Rindenerkennung von Eiche

Tab. 11: Parameter für die besten Ergebnisse der Optimierung für die Rindenerkennung von Eiche

Ergebnis	Anzahl Sample Min	Max	Offset Rinde	Luft	Mittel	Median	StAw	Min	Max	Std Rang	Mittel Rang	Median rang	Summe Rang
Top Rinde gesamt	24	29	-1.3	170	-0.007	0.047	4.572	-14.804	9.453	77	6	46	129
Top Rinde mittl. Std	24	29	-1.3	160	0.005	0.076	4.572	-14.804	9.453	78	3	75	81
Top Rinde Median Std	22	27	-2.2	170	-0.263	0.003	4.565	-14.704	9.229	59	262	3	62
Top Rinde Stddev	28	33	-0.5	130	-0.805	-0.373	4.53	-14.502	9.253	1	839	422	1
Top Rinde Avg	20	25	-2	190	-0.001	0.615	6.294	-27.594	10.754	3889	1	645	1
Top Rinde Median	30	35	0.8	160	-0.621	-0.003	5.939	-18.728	11.1	3509	627	1	1

Für die Erkennung des Kernholzes wurden die besten Ergebnisse für alle Kennwerte sowie für Mittelwert und Standardabweichung bei einem Schwellwert für Luft von 200 erreicht. Die Klassengrenzen für sicheres Kernholz lag bei 67 % des Radius, die für „wahrscheinlich Kernholz“ bei 70% des Radius. Die äußeren 21 mm waren sicher kein Kernholz. Eine Herabsenkung des Schwellwertes für Luft auf 140 bei sonst gleichen Einstellungen erbrachte das beste Ergebnis für Median und Standardabweichung bei etwas höheren Mittelwert der Abweichung zur Referenzmessung (**Tab. 12**, Abb. **25**).

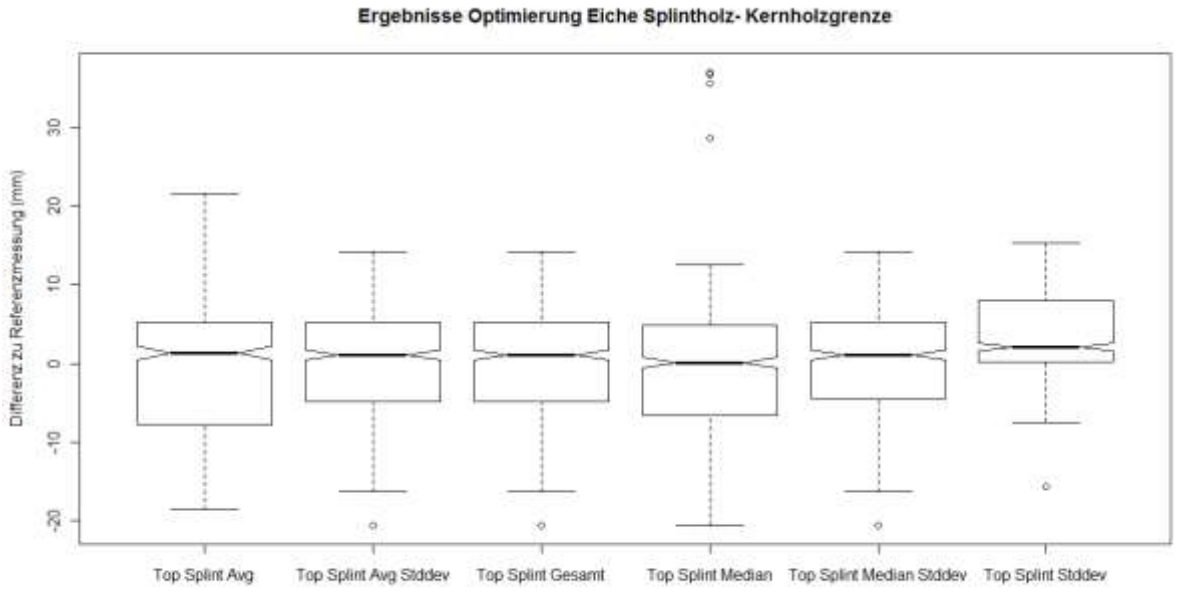

Abb. 25: Streuung der Differenz zur Referenzmessung der Ergebnisse der Optimierung für die Kernholzerkennung von Eiche

Tab. 12: Parameter für die besten Ergebnisse der Optimierung für die Splintholz-Kernholzgrenze von Eiche

Ergebnis	Luft	Sicher kein KH	Sicher KH	Wahr-scheinlich KH	Mittel	Median	StAw	Min	Max	Std Rang	Mittel Rang	Median Rang	Summe Rang
Top Splint gesamt	200	21	67	70	0.182	1.101	7.683	-20.693	14.232	108	10	152	270
Top Splint mittl. Std.	200	21	67	70	0.182	1.101	7.683	-20.693	14.232	108	10	152	118
Top Splint Median Std	140	21	67	70	0.406	1.101	7.643	-20.693	14.232	106	32	151	257
Top Splint Std	160	15	67	70	3.337	1.951	6.197	-15.690	15.401	1	461	538	1
Top Splint Avg	200	25	67	70	-0.026	1.172	9.362	-18.643	21.636	463	1	428	1
Top Splint Median	100	23	65	74	0.747	-0.042	12.121	-20.693	37.16	1298	71	1	1

2.3.1.3 Erkennungsverfahren Robinie

Auch für die Robinie wurden Messungen an von Histogrammen und Dichte Verlauf entlang der Messstrecken durchgeführt. Anders als bei Kastanie oder Eiche konnte mittels dieser Messungen jedoch keine allgemeingültige Regel festgelegt werden. Grund dafür war der unterschiedliche Wassergehalt von Referenzscheiben und den Stämmen, für welche die Erkennungsverfahren entwickelt werden sollten. Die Referenzscheiben wurden direkt nach dem Einschlag gescannt, so dass das Splintholz einen erhöhten Feuchtigkeitsgehalt hatte (Abb. **6**, links). Die zu analysierenden Stämme wurden erst nach ca. 6-monatiger Lagerzeit gescannt, der Feuchtigkeitsgehalt im Splintholz war deutlich geringer (Abb. **6**, Mitte). Das zum Zeitpunkt der Referenzmessungen noch vorhandene Restmaterial der zu analysierenden Stämme war mittlerweile so stark getrocknet, dass sich die Rinde an weiten Teilen vollständig abgelöst hatte. In der noch vorhandenen Rinde war der sonst gut erkennbare Bast stellenweise soweit getrocknet, dass eine Abgrenzung zu anderen Holzmerkmalen nicht mehr möglich war (Abb. **6**, rechts).

Die Referenzmessungen an den frischen Stammscheiben zeigen, dass die Borke eine deutlich niedrigere Dichte als Bast und Holzkörper hat. Letztere haben eine ähnliche Streuung, wobei das Splintholz die im Mittel höchste Dichte hat, gefolgt von Bast und Rinde (Abb. **26**). Der hohe Wassergehalt des Splintholzes wird auch bei der Betrachtung der Dichtewerte entlang von Radien sichtbar(Abb. **27**). Ein erster Peak der Dichte liegt innerhalb des Bastes, und wird durch einen weiteren Peak der Dichte im Bereich des Splintholzes gefolgt.

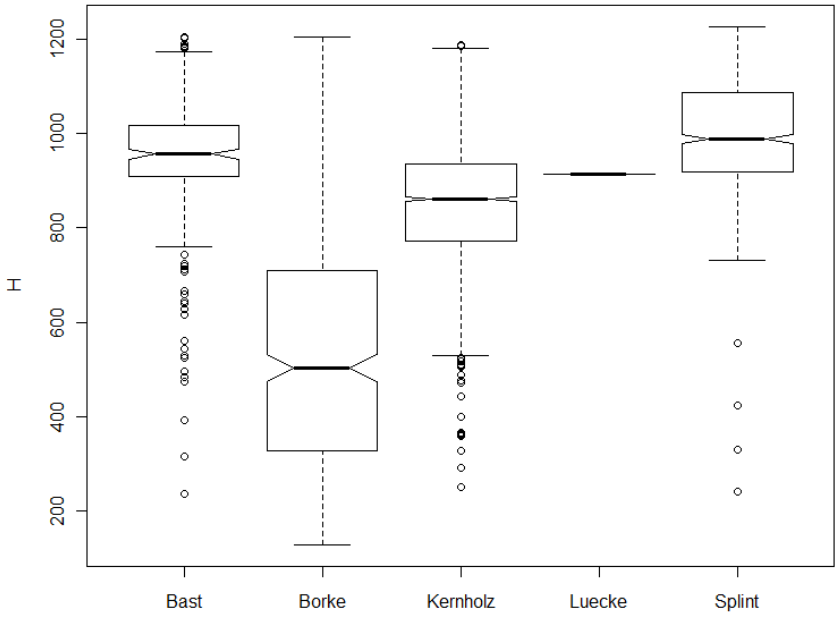

Abb. 26: Kastengrafiken der Holzmerkmale der Robinie. Lücke bezeichnet den Spalt zwischen Bast und Splint bei sich ablösender Rinde.

Bei den zu analysierenden Stämmen war dies anders. Eine optische Analyse der CT-Bilder ergab, dass hier der Bast die höchste Dichte hat, Kern und Splintholz weisen ähnliche Werte auf. Der im Radialverlauf auftretende, den Peak des Bastes überlagernde Splintholz-Peak ist nicht zu erkennen.
Trotz dieser Veränderungen im Absorptionsverhalten des Robinienholzes war es möglich, einen funktionierenden Algorithmus zur Rindenerkennung der getrockenen Robinien zu entwickeln. Aussagen zur Genauigkeit sind jedoch auf Grund der starken Unterschiede zwischen Probestämmen und Referenzscheiben nicht möglich. Ebenso konnten die Parameter nicht einer Optimierung unterzogen werden.
Eine Unterscheidung zwischen Splint- und Kernholz der Robinie war aufgrund zu geringer Kontraste im CT-Bild nicht möglich.

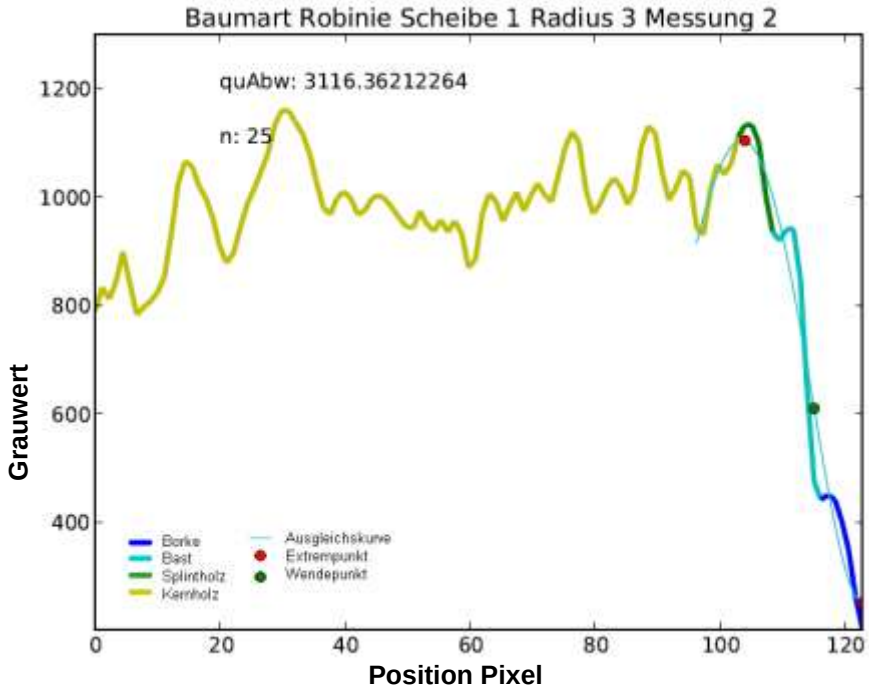

Abb. 27: Grauwerte entlang eines Messradius einer Stammscheibe von Robinie mit Ausgleichskurve Polynomfunktion 3. Ordnung) berechnet mit der Methode der kleinsten Quadrate.

Erkennung der Rinde-Splintholz-Grenze

Das Verfahren zur Erkennung der Rinde der Robine ähnelt im Ansatz denen der Eiche und der Kastanie. Auch für die Robinie wurde ein charakteristischer Kurvenverlauf der Grauwertkurve entlang eines Radialschnitts im Bereich von Rinde und Splintholz unterstellt. Der Kurvenverlauf ähnelt einer kubischen Funktion. Von außen kommend steigt die Kurve erst an, um im Bereich des Bastes zu kumulieren. Im Bereich des Wendepunktes vor dem nächsten Minimum liegt die Rindengrenze. Die Stärke der Rinde der Robinie schwankt stark im Querschnitt. Dadurch variiert auch die Anzahl der benötigten Eingangswerte für eine Ausgleichsfunktion stark. Ist die Rinde stark und die Anzahl der Eingangswerte zu klein, kann die Rindengrenze nicht erkannt werden. Ist die Rinde schwach und die Anzahl der Eingangswerte zu groß, können Schwankungen der Grauwerte im Bereich des Kernholzes fälschlicherweise für die Rindengrenze gehalten werden.

Die Borke der Robinie hat eine deutlich niedrigere Dichte als die übrigen Kompartimente. Durch Setzen eines Schwellwertes (500) für Borke ist es möglich, recht zuverlässig die Ausgleichsrechnung erst im Bereich des Bastes beginnen zu lassen, und somit die negativen Einflüsse durch die starken Schwankungen der Rindenstärke zu minimieren.

Die Erkennung der Grenze zwischen Borke und Bast mittels Schwellwert erfolgt zweistufig. Zunächst wird der erste Punkt von außen kommend gesucht, anschließend nochmals von innen her kommend. Liegen beide Punkte auseinander, wird der innere als Grenzpunkt ausgewählt. Liegen sie über eine Distanz von mehr als 5 Pixel auseinander, wird von einer fehlenden Rinde ausgegangen.

Die Berechnung der Ausgleichskurve erfolgt wie bei Kastanie und Eiche mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

Rindenablösungen sowie auswachsende Äste werden ebenfalls wie bei den anderen Baumarten erkannt. Aufgrund der starken Variation der Rindenstärke funktioniert die Erkennung von Rindenschäden bei der Robinie nicht. Die alternative Methode wurde bereits weiter oben im Abschnitt beschrieben.

2.3.2. Auswertung des Stammmaterials

2.3.2.1 Kastanie

Das entwickelte Verfahren zur Erkennung von Rinde, Splint- und Kernholz der Kastanie wurde für 32 Stammabschnitte angewendet. Alle Abschnitte konnten dabei sicher ausgewertet werden. Die Ergebnisse der Auswertung flossen in die Modellierung der Druckbruchfestigkeit der am KIT laufenden Untersuchungen des Projekt CT-Spec ein.

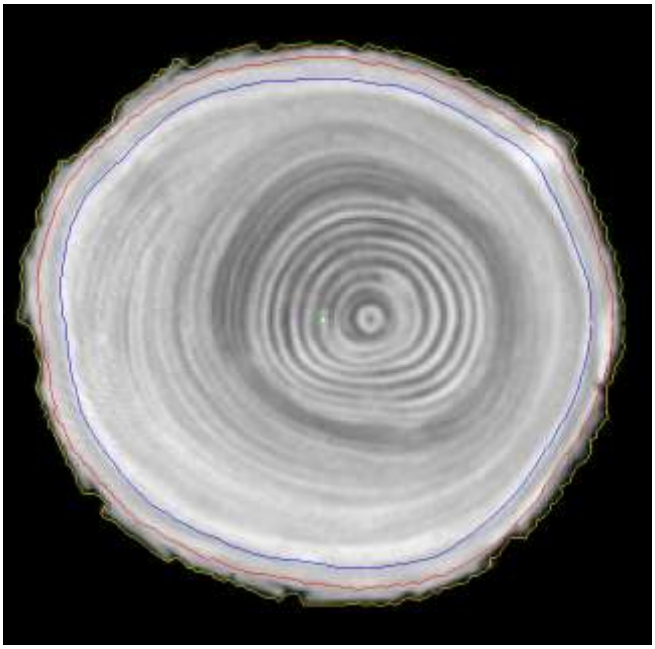

Abb. 28: Querschnitt eines Kastanienstammes. Sowohl Rinde als auch Kernholz konnten zuverlässig erkannt werden.

Dichtevariation von Rinde, Splintholz und Kernholz von Kastanie im CT

Abb. 29 bis **Abb. 31** zeigt die Variation der Dichte für Rinde, Splintholz und Kernholz je Voxel. Für Splintholz und Kernholz zeigen sich ähnliche Häufigkeitsverteilungen mit den größten Häufigkeiten für die Dichte zwischen 850 kg/m³ und 1000 kg/m³. Die Rinde zeigt ebenfalls ein Häufigkeitsmaximum für die Dichte bei 800 kg/m³, zeigt die Verteilung eine starke Schiefe.

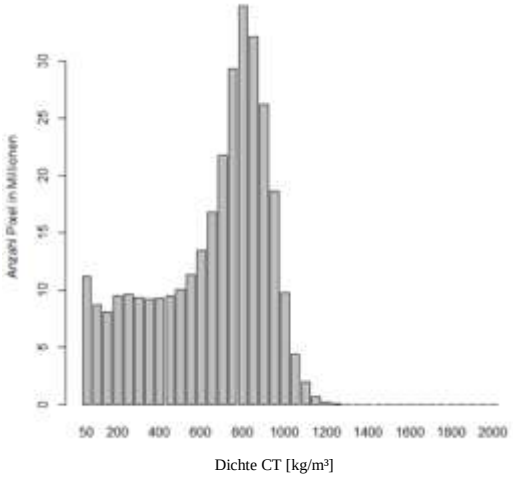

Abb. 29: Variation der frischen Dichte [kg/m³] der Rinde für Kastanie im CT-Scan

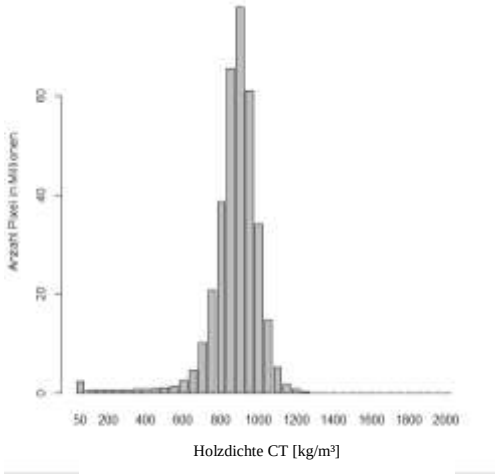

Abb. 30: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Splintholzes für Kastanie im CT-Scan

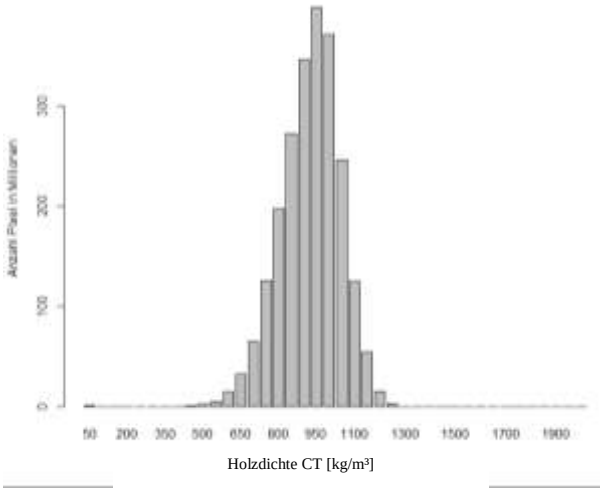

Abb. 31: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Kernholzes für Kastanie im CT-Scan

Rindenstärke und Rindenanteil am Durchmesser

Die Beziehung zwischen der doppelten Rindenstärke und dem Durchmesser ist für die Kastanie in **Abb. 32** dargestellt. Datengrundlage sind Durchschnittswerte der doppelten Rindenstärke und Durchmesser pro laufender Meter (n=434) der gescannten Stammabschnitte. Die Rindenstärke streut breit über den Stammdurchmesser, es lässt sich für das untersuchte Stammmaterial keine eindeutige Veränderung der Rindenstärke mit dem Baumalter oder Stammdimension ableiten.
Als Folge des oben gesagten, nimmt der Anteil der Rinde am Durchmesser jedoch deutlich mit zunehmendem Durchmesser ab (**Abb. 33**), da die absolute Rindenstärke mehr oder weniger konstant bleibt für das untersuchte Material.

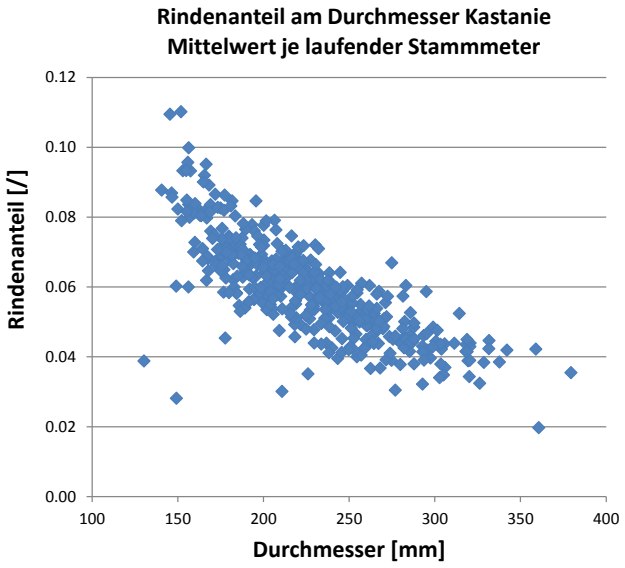

Abb. 32: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Rindenstärke für Kastanie

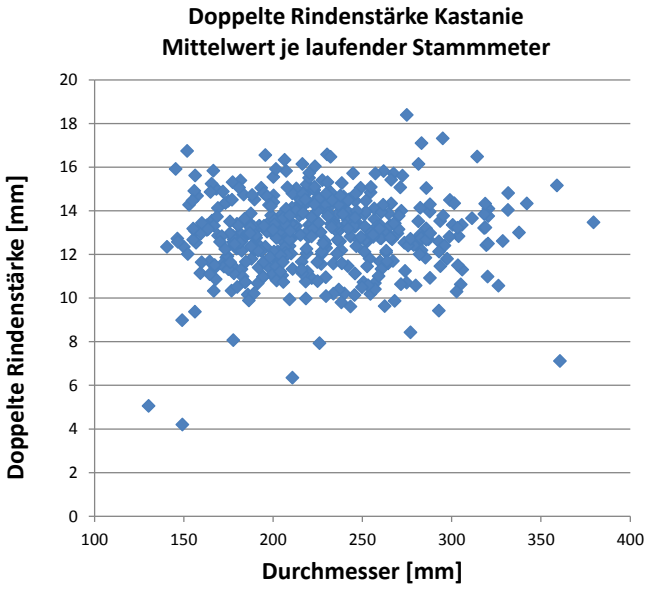

Abb. 33: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Rindenanteil für Kastanie

Prozentualer Rindenanteil zum Gesamtvolumen

Auch für die Beziehung zwischen Rindenanteil und dem Durchmesser für die Kastanie wurde auf der Datengrundlage von Durchschnittswerten des Rindenanteils und des Durchmesser pro laufender Meter (n=434) aller gescannten Stammabschnitte der Anteil der Rinde am Gesamtabschnittsvolumen bestimmt. Das Streudiagramm weist einen eindeutigen negativen Trend auf. Die Streuung der Daten ist gering.
Für alle getesteten Modelle erwiesen sich sämtliche Koeffizienten als stark bis hoch signifikant. Die Varianzanalyse zeigte jedoch, dass sich Modell 1 mit der kleinsten Residuen-Summe stark signifikant von den anderen Modellen unterscheidet.

Tab. 13: Regressionsmodelle Rindenanteil am Gesamtvolumen für Kastanie

Nr.	Modell Formel	Koeffi-zient	Schätzwert	Standard-fehler	T Wert	Pr (<|t|)
1	vol ~ 200 * (B + C * d) * (1 - 0.5 * (B + C * d))	A	1.888e+00	1.939e-03	974.02	<2e-16 ***
		B	2.321e-03	8.356e-05	27.77	<2e-16 ***
		Residual standard error: 1.498 on 432 degrees of freedom Residual sum: 969.22 Number of iterations to convergence: 12 Achieved convergence tolerance: 3.892e-08				
2a	vol ~ 200 * ((A + exp(d * B))/d) * (1 - 0.5 * ((exp(d * B) +A)/d))	A	0.158474	0.037356	4.242	2.71e-05 ***
		B	0.005671	0.001532	3.703	0.000241 ***
		Residual standard error: 1.514 on 432 degrees of freedom Residual sum: 989.75 Number of iterations to convergence: 7 Achieved convergence tolerance: 3.652e-06				
2b	vol ~ 200 * ((exp(d * B))/d) * (1 - 0.5 * ((exp(d * B))/d))	B	0.0115453	0.0003028	38.12	<2e-16 ***
		Residual standard error: 1.548 on 433 degrees of freedom Residual sum: 1037.16 Number of iterations to convergence: 3 Achieved convergence tolerance: 3.125e-07				

Prozentuales Splintholzvolumen und Kernholzvolumen

Der prozentuale Anteil des wasserführenden Splint nimmt für die Kastanie ebenfalls mit zunehmendem Stammdurchmesser ab (**Abb. 34**). Gegengleich steigt das Volumen mit dem dauerhaften Kernholz an (**Abb. 35**). **Tab. 14** fasst die Ergebnisse für zwei Regressionsmodelle für den Anteil des Splintes in der Querschnittsfläche zusammen.

Tab. 14: Regressionsmodelle Splintholzanteil für Kastanie

Nr.	Modell Formel	Koeffi-zient	Schätzwert	Standard-fehler	T Wert	Pr (<|t|)
1	vol ~ 20 * (A/d + B + C * d) * (1 - 0.05 * (A/d + B + C * d))	A	-1.241e+01	4.617e+00	-2.688	0.00844 **
		B	1.986e+01	4.372e-01	45.418	<2e-16 ***
		C	9.056e-05	1.007e-02	0.009	0.99285
		Residual standard error: 2.113 on 98 degrees of freedom Residual sum: 437.75 Number of iterations to convergence: 11 Achieved convergence tolerance: 2.946e-06				
2	vol ~ 20 * (A/d + B) * (1 - 0.05 * (A/d + B))	A	12.45141	1.14332	-10.89	<2e-16 ***
		B	19.86267	0.05622	353.31	<2e-16 ***
		Residual standard error: 2.102 on 99 degrees of freedom Residual sum: 437.75 Number of iterations to convergence: 3 Achieved convergence tolerance: 2.074e-06				

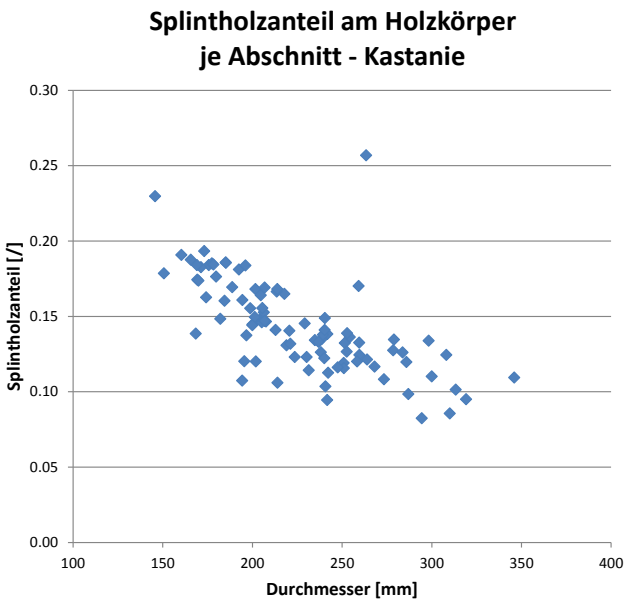

Abb. 34: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Splintholzanteil für Kastanie

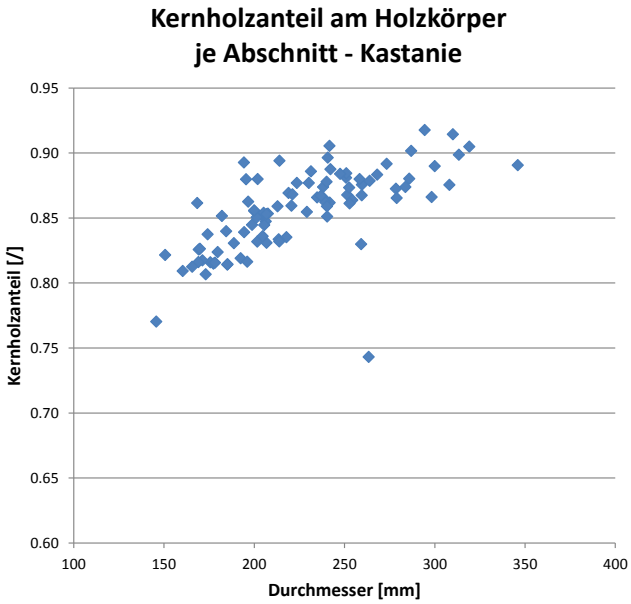

Abb. 35: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Kernholzanteil für die Kastanie

2.3.2.2 Eiche

Das entwickelte Verfahren zur Erkennung von Rinde, Splint- und Kernholz der Eiche wurde für 23 Stämme angewendet. Alle Stämme konnten dabei sicher ausgewertet werden. Die Ergebnisse der Auswertung flossen in die Modellierung der Drucktragfestigkeit der am KIT laufenden Untersuchungen ein.

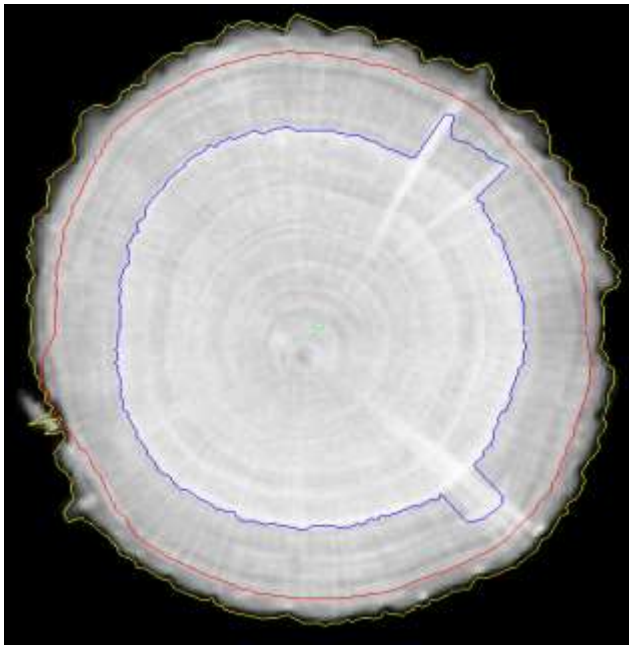

Abb. 36: Querschnitt eines Eichenstammes. Die Rinde konnte zuverlässig erkannt werden. Bei der Erkennung des Kernholzes traten immer wieder Fehler auf. So z.B. beim Auftreten von Markstrahlen.

Dichtevariation von Rinde, Splintholz und Kernholz im CT für die Eiche

Ähnlich wie für die Kastanie, zeigt auch die Eiche eine starke Variation der Dichte für Rinde, Splintholz und Kernholz je Voxel (**Abb. 37** bis **Abb. 39**). Für Splintholz und Kernholz zeigen sich ähnliche Häufigkeitsverteilungen mit der größten Häufigkeit bei 950 kg/m³ kg/m³. Die Rinde zeigt ebenfalls ein Häufigkeitsmaximum für die Dichte bei 950 kg/m³, zeigt die Verteilung ebenfalls eine starke Schiefe.

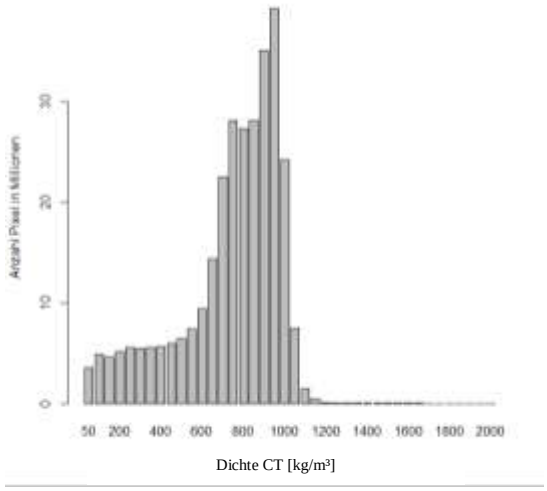

Abb. 37: Variation der frischen Dichte [kg/m³] der Rinde für Eiche im CT-Scan

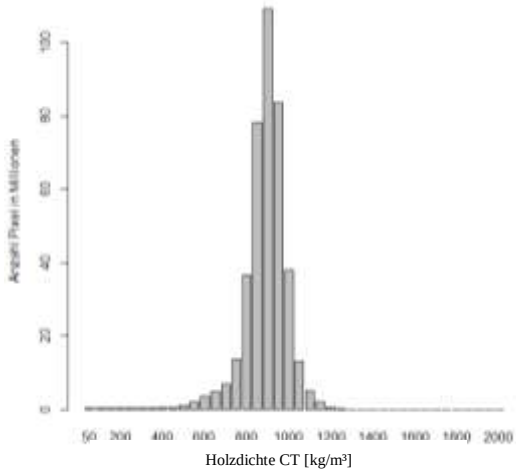

Abb. 38: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Splintholz für Eiche im CT-Scan

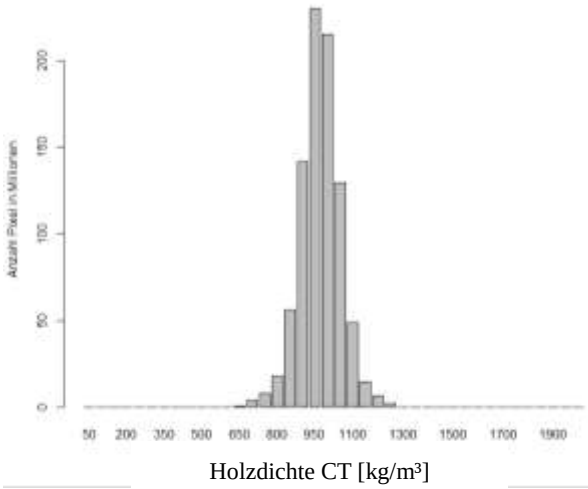

Abb. 39: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Kernholz für Eiche im CT-Scan

Rindenstärke bei der Eiche

Die Rindenstärke bleibt beim untersuchten Material in dieser schwachen Dimension in breiter Streuung über den Stammdurchmesser konstant (**Abb. 40**). Für die Beziehung zwischen Rindenanteil und Durchmesser der Eiche wurden die Datensätze der mittleren Rindenanteile sowie mittleren Durchmessers je laufenden Meter verwendet. Das Streudiagramm weist einen negativen Trend mit geringer Streuung auf (**Abb. 41**).

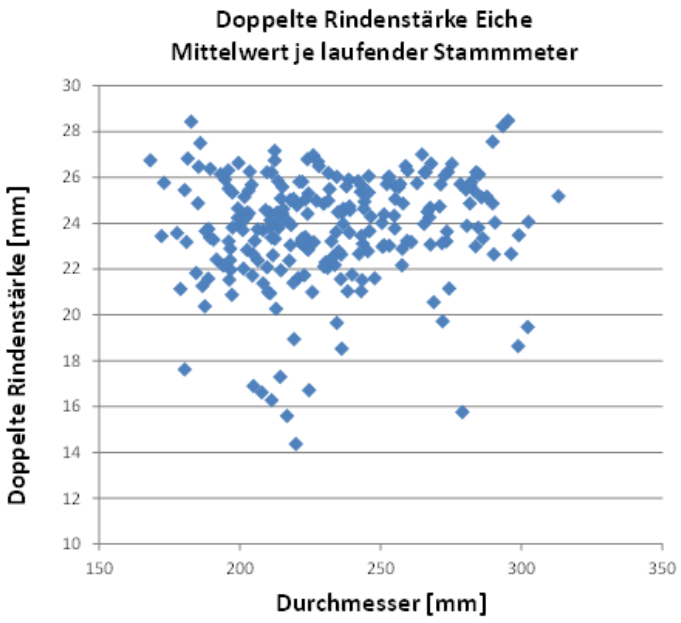

Abb. 40: Variation der Rindenstärke über den Stammdurchmesser für Eiche

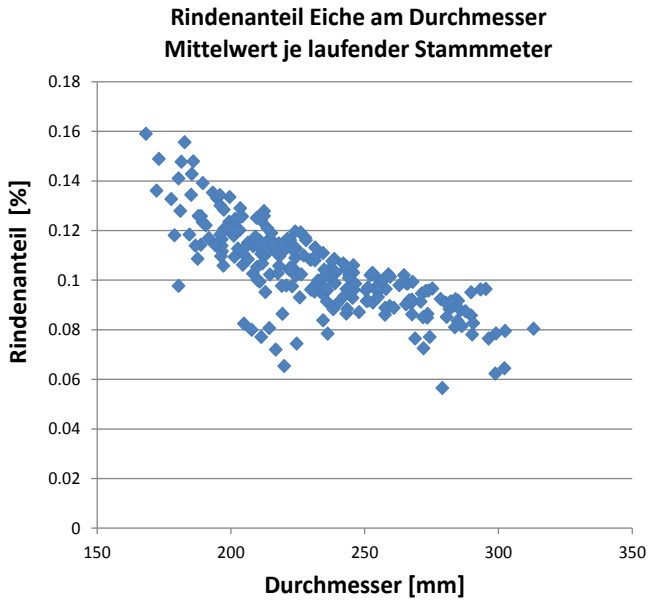

Abb. 41: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Rindenanteil für Eiche

Die Beziehung zwischen Rindenanteil und Stammdurchmesser ist durch folgende Regressionsmodelle 1, 2, 3 sowie 4 darstellbar. Bis auf die Koeffizienten C des Modells 2 sowie B des Modells 4 waren alle Koeffizienten stark signifikant. Modell 1 unterschied sich nicht signifikant von den übrigen Modellen, hatte jedoch mit die kleinste Residuen-Summe. Modell 4 hatte sogar eine noch etwas geringere Residuen-Summe, durch die fehlende Signifikanz des Koeffizienten B ist dieses jedoch nicht vorzuziehen

Tab. 15: Regressionsmodelle zur Herleitung des Rindenanteils am Stammquerschnitt für Eiche

Nr.	Modell	Koeffizient	Schätzwert	Standartfehler	T Wert	Pr (<|t|)
1	vol ~ 200 * (A/d + B) * (1 - 0.5 * (A/d + B))	A	-2.211131	0.118404	-18.67	<2e-16 ***
		B	1.993078	0.005202	383.15	<2e-16 ***
		Residual standard error: 1.887 on 218 degrees of freedom Residual sum: 776.12 Number of iterations to convergence: 8 Achieved convergence tolerance: 2.371e-07				
2	vol ~ 200 * (A/d + B + C * d) * (1 - 0.5 * (A/d + B + C * d))	A	-3.256252	0.794594	-4.098	5.89e-05 ***
		B	2.083900	0.068471	30.435	< 2e-16 ***
		C	-0.001936	0.001455	-1.330	0.185
		Residual standard error: 1.884 on 217 degrees of freedom Residual sum: 769.83 Number of iterations to convergence: 12 Achieved convergence tolerance: 1.512e-06				
3	vol ~ 200 * (B + C * d) * (1 - 0.5 * (B + C * d))	A	1.8040378	0.0052892	341.08	<2e-16 ***
		B	0.0039620	0.0002236	17.71	<2e-16 ***
		Residual standard error: 1.951 on 218 degrees of freedom Residual sum: 829.66 Number of iterations to convergence: 12 Achieved convergence tolerance: 4.668e-07				
4	vol ~ 200 * ((A + exp(d * B))/d) * (1 - 0.5 * ((exp(d * B) + A)/d))	A	1.219136	0.103490	11.780	<2e-16 ***
		B	0.006116	0.003938	1.553	0.122
		Residual standard error: 1.887 on 218 degrees of freedom Residual sum: 775.98 Number of iterations to convergence: 7 Achieved convergence tolerance: 3.073e-06				
5	vol ~ 200 * ((exp(d * B))/d) * (1 - 0.5 * ((exp(d * B))/d))	B	0.0367698	0.0004344	84.64	2e-16 ***
		Residual standard error: 2.77 on 219 degrees of freedom Residual sum: 1680.72 Number of iterations to convergence: 4 Achieved convergence tolerance: 7.258e-06				

Prozentualer Splintholzanteil und Kernholzanteil der Eiche

Der Splintholzanteil variieren beim untersuchten Eichen-Material in breiter Streuung zwischen 24% bis 37%. Gegengleich schwankt der dauerhafte Kernholzbereich zwischen 63 bis 76%. Für eine Verwendung im Freien muss diese Verteilung in die Bemessung von Trägerdimensionen eingerechnet werden, da der nichtdauerhafte Splint über die Zeit als tragender Querschnitt möglicher Weise verloren gehen wird.

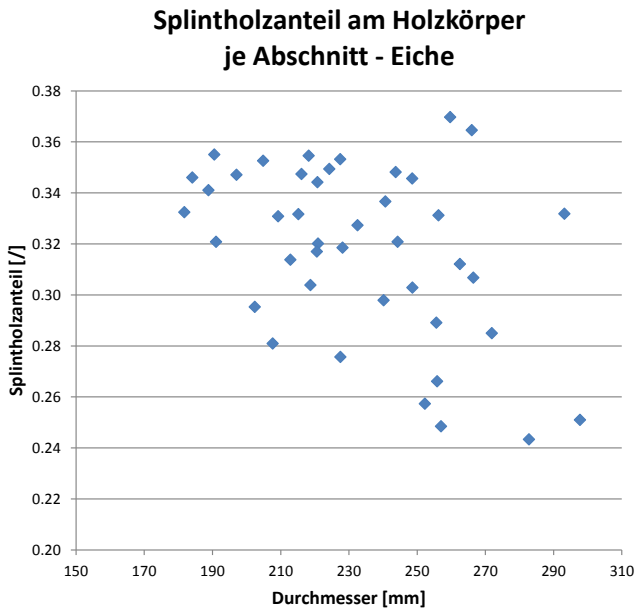

Abb. 42: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Splintholzanteil für Eiche

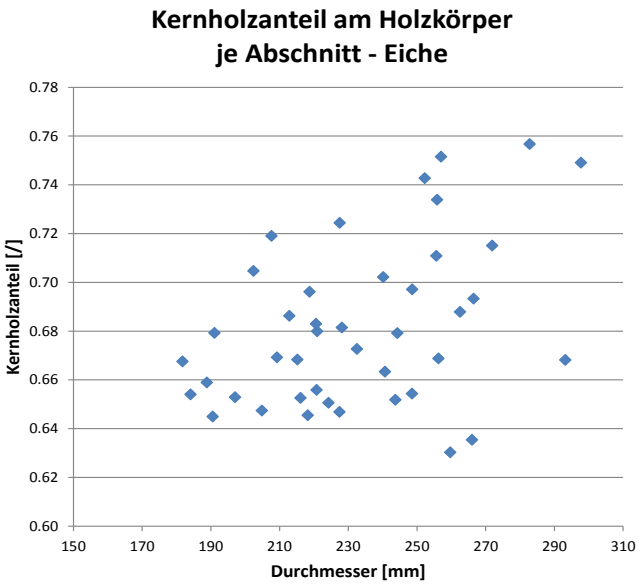

Abb. 43: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Kernholzanteil für Eiche

2.3.2.3 Robinie

Das entwickelte Verfahren zur Erkennung von Rinde der Robinie wurde für 30 Stammabschnitte angewendet. Die Rinde wurde für die meisten Stämme zuverlässig erkannt (Abb. **44**). Bei vier Stammabschnitten konnten jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht werden. Grund war starker Bewuchs mit Efeu oder großflächig fehlende Rinde (Abb. **45**). Der Efeu-Bewuchs hatte stark negativen Einfluss auf die Erkennungsverfahren. Anstelle der weiter innen liegenden Rinde wurde der Efeu als Stammaussenkante erkannt. Auch die großflächigen Rindenschäden wurden nicht erkannt. In diesen Fällen lag die Rindengrenze nicht wie zu erwarten an der Stammaußenkante sondern weiter innen. Bei einer kleinen Zahl von Stämmen wurde das Signal des CT fehlerhaft rekonstruiert (Abb. **45**), dies schien jedoch keinen direkten negativen Einfluss auf die Erkennungsverfahren zu haben. Die Ergebnisse der Auswertung flossen in die Modellierung der Drucktragfestigkeit der am KIT laufenden Untersuchungen ein.

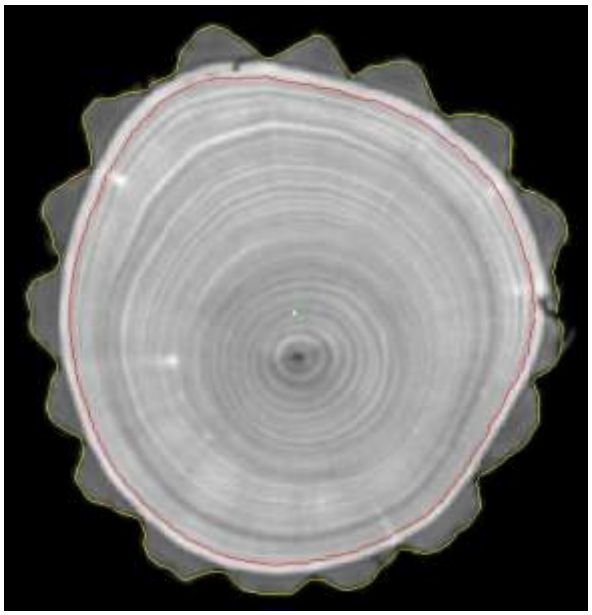

Abb. 44: Querschnitt eines Robinienstammes. Die Rinde konnte in der Regel zuverlässig erkannt werden.

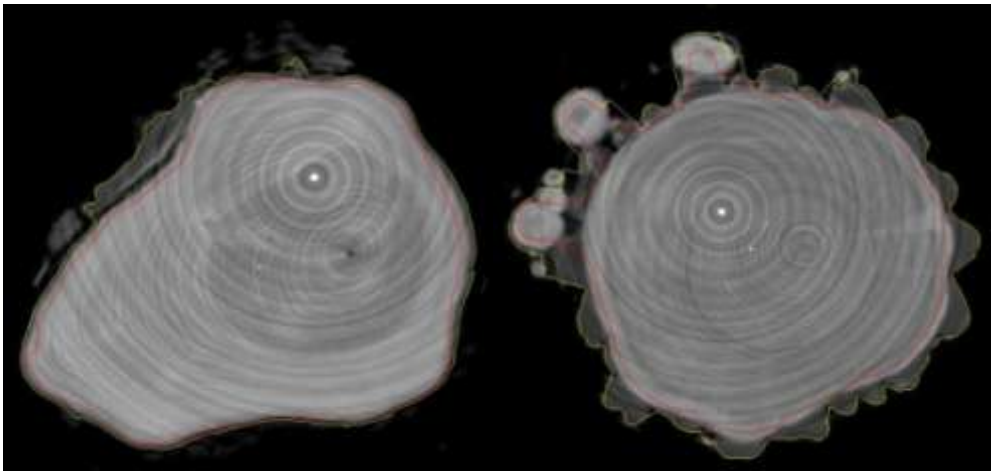

Abb. 45: Querschnitte zweier Robinienstämme. Während der Rekonstruktion des CT-Bildes traten Fehler auf. Diese haben das Erkennungsverfahren nicht beeinträchtigt. Hingegen führte großflächig fehlende Rinde (links) und Efeubewuchs (rechts) zu Fehlern.

Dichtevariation von Rinde, Splintholz und Kernholz im CT für die Robinie

Die Robinie zeigt ebenfalls eine starke Variation der Dichte für Rinde, Splintholz und Kernholz je Voxel (**Abb. 46** und **Abb. 47**). Splintholz und Kernholz zeigen sich ähnliche Häufigkeitsverteilungen mit der größten Häufigkeit bei 900 kg/m³. Die Rinde zeigt im Unterschied zu Eiche und Kastanie eine zweigipfelige Häufigkeitsverteilung für die Dichte bei einen ersten Maximum bei 400 kg/m³ und einem weiteren Maximum bei 950 kg/m³.

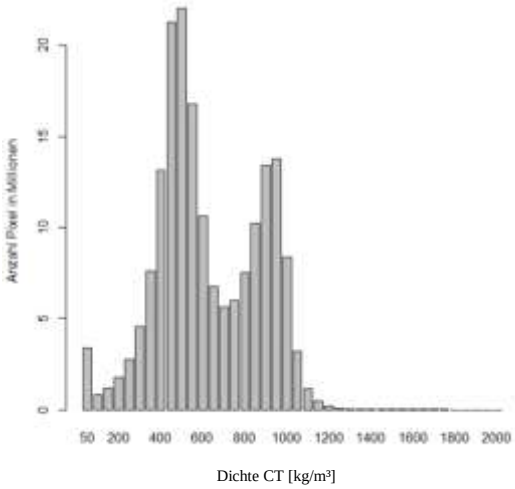

Abb. 46: Variation der frischen Dichte [kg/m³] der Rinde für Eiche im CT-Scan

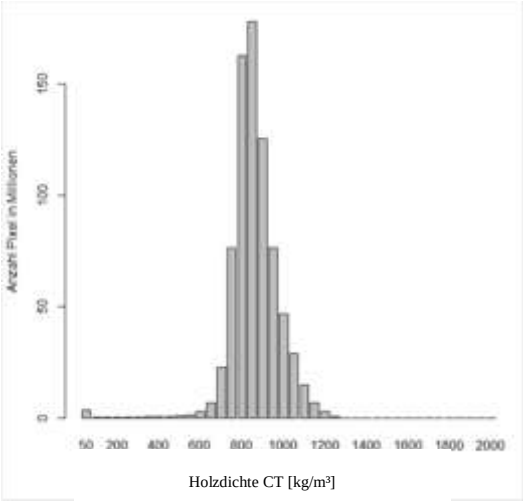

Abb. 47: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Holz für Robinie im CT-Scan

Rindenstärke und prozentualer Rindenanteil zum Gesamtvolumen

Die Modellberechnungen zur Beziehung von doppelter Rindenstärke und Durchmesser der Robinie basieren auf 137 Datensätzen der mittleren doppelten Rindenstärke sowie des mittleren Durchmessers je laufender Meter der gescannten Stammabschnitte. Auf dem Streudiagramm der Daten ist ein positiver ansteigender Trend zu erkennen. Die Daten streuen jedoch stark

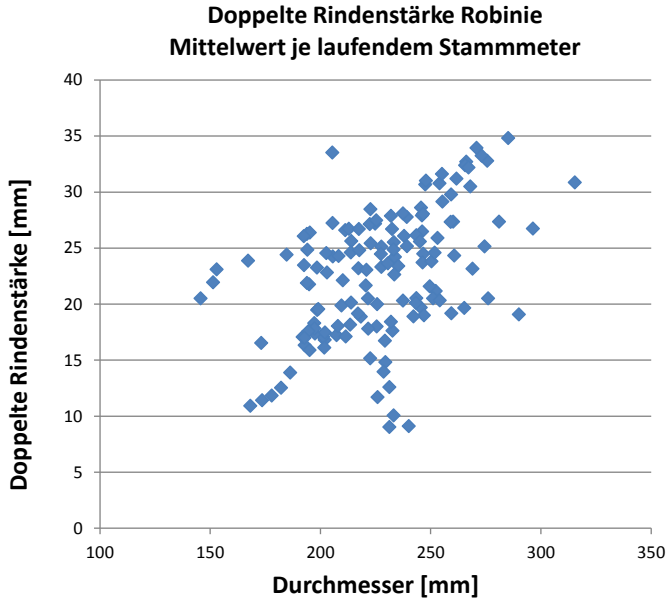

Abb. 48: Variation der Rindenstärke über den Stammdurchmesser für Robinie

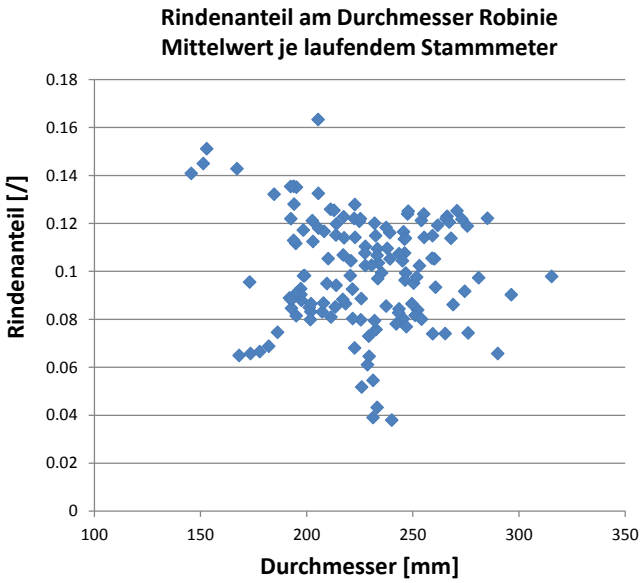

Abb. 49: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Rindenanteil für Robinie

Es wurden fünf Modelle getestet, um die Beziehung zwischen Rindenanteil und Holzvolumen aufzuzeigen. Diese unterschieden sich jedoch kaum in der Beschreibung der Qualität der Beziehung. Für Modell 2 konnte keine Signifikanz der Koeffizienten ermittelt werden, für Modell 1, 3 und 5 hatte jeweils einer der Koeffizienten keine Signifikanz. Nur Modell 3 mit einem Koeffizienten war entsprechend befriedigend.

Tab. 16: Modelle zur Herleitung des Rindenanteils am Stammquerschnitt für Robinie

Modell	Formel	Koeffizient	Schätzwert	Standartfehler	T Wert	Pr (<|t|)
1	R ~ A + Bd	A	0.10671	0.32772	0.326	0.745
		B	0.09576	0.01422	6.732	4.39e-10 ***
		Residual standard error: 0.5141 on 135 degrees of freedom Residual sum: 35.675 Number of iterations to convergence: 1 Achieved convergence tolerance: 1.414e-08				
2	R ~ A + Bd + Cd²	A	2.529187	1.783559	1.418	0.158
		B	-0.119579	0.156503	-0.764	0.446
		C	0.004698	0.003401	1.382	0.169
		Residual standard error: 0.5123 on 134 degrees of freedom Residual sum: 35.174 Number of iterations to convergence: 1 Achieved convergence tolerance: 1.13e-06				
3	R ~ Bd + Cd²	A	1.013e-01	1.491e-02	6.798	3.11e-10 ***
		B	-4.246e-05	6.251e-04	-0.068	0.946
		Residual standard error: 0.5143 on 135 degrees of freedom Residual sum: 35.702 Number of iterations to convergence: 1 Achieved convergence tolerance: 1.132e-06				
4	R ~ A + e^{BD}	A	-0.17385	0.17556	-0.99	0.324
		B	0.03923	0.00297	13.21	<2e-16 ***
		Residual standard error: 0.5119 on 135 degrees of freedom Residual sum: 35.374 Number of iterations to convergence: 34 Achieved convergence tolerance: 1.745e-07				
5	R ~ e^{BD}	B	0.0362652	0.0007951	45.61	<2e-16 ***
		Residual standard error: 0.5118 on 136 degrees of freedom Residual sum: 35.621 Number of iterations to convergence: 32 Achieved convergence tolerance: 9.137e-06				

Für die Herleitung der Beziehung von Rindenanteil und Durchmesser der Robinie wurden insgesamt 137 Datensätze der mittleren Rindenanteile und mittleren Durchmesser je laufender Meter der gescannten Stämme herangezogen. Das Streudiagramm der verwendeten Daten weist eine starke Streuung auf, ein eindeutiger Trend ist nicht erkennbar.

Entsprechend schlecht passen die getesteten Modelle. Für Modell 1, 3 sowie 4 ist ein von zwei Koeffizienten nicht signifikant, für Modell 2 sind zwei von drei Koeffizienten nur leicht signifikant. Der einzelne Koeffizient von Modell 5 weist jedoch eine hohe Signifikanz auf.

Die Varianzanalyse ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen. Die Summe der Residuen liegen alle nah beieinander, ist jedoch für Modell 2 am niedrigsten.

Tab. 17: Regressionsmodelle zur Herleitung des Rindenanteils am Stammvolumen für Robinie

Modell	Formel	Koeffizient	Schätzwert	Standartfehler	T Wert	Pr (<|t|)
1	vol ~ 200 * (A/d + B) * (1 - 0.5 * (A/d + B))	A	-0.19223	0.28907	-0.665	0.507
		B	1.90597	0.01303	146.298	<2e-16 ***
		Residual standard error: 3,836 on 135 degrees of freedom Residual sum: 1986,4 Number of iterations to convergence: 8 Achieved convergence tolerance: 7,906e-07				
2	vol ~ 200 * (A/d + B + C * d) * (1 - 0.5 * (A/d + B + C * d))	A	-3.306628	1,507776	-2.193	0.0300 *
		B	2.193366	0.137062	16.003	<2e-16 ***
		C	-0.006499	0.003083	-2.108	0.0369 *
		Residual standard error: 3.787 on 134 degrees of freedom Residual sum: 1921.7 Number of iterations to convergence: 12 Achieved convergence tolerance: 9.342e-07				
3	vol ~ 200 * (B + C * d) * (1 - 0.5 * (B + C * d))	A	1.8939654	0.0136459	138.793	<2e-16 ***
		B	0.0001498	0.0005922	0.253	0.801
		Residual standard error: 3.841 on 135 degrees of freedom Residual sum: 1992.0 Number of iterations to convergence: 12 Achieved convergence tolerance: 9.083e-07				
4	vol ~ 200 * ((A + exp(d * B))/d) * (1 - 0.5 * ((exp(d * B) + A)/d))	A	-0.153883	0.156062	-0.986	0.326
		B	0.039726	0.002797	14.203	<2e-16 ***
		Residual standard error: 3,806 on 135 degrees of freedom Residual sum: 1955,8 Number of iterations to convergence: 7 Achieved convergence tolerance: 1,339e-07				
5	vol ~ 200 * ((exp(d * B))/d) * (1 - 0.5 * ((exp(d * B))/d))	B	0.0369679	0.0007686	48.1	<2e-16 ***
		Residual standard error: 3.805 on 136 degrees of freedom Residual sum: 1955.8 Number of iterations to convergence: 4 Achieved convergence tolerance: 3.037e-06				

2.4. VALIDIERUNG DER HOLZDICHTE-BESTIMMUNG DURCH REFERENZMESSUNGEN

2.4.1. Vorgehensweise

An jedem Baum wurden 3 nach dem CT-Scan zu entnehmende Stammscheiben in verschiedenen Baumhöhen markiert. Die Scheiben, mit einer jeweiligen Dicke von 5 cm, wurde bei einer Stammabschnittslänge von 0,08 – 0,13 m, 5,27 – 5,32 m und bei ca. 10,70m markiert und nach dem Scannen für die Untersuchungen aus den Abschnitten herausgetrennt. Auf den einzelnen Stammscheiben wurde die Orientierung des Scans nachvollzogen, und jede einzelne Probe beschriftet (**Abb. 48**).

Abb. 50: Rindenstärke und Rindenanteil am Durchmesser

Für alle Proben wurde entsprechend der DIN 52182 sowie der DIN 52183 die Darrdichte sowie die Holzfeuchtigkeit bestimmt. Aus den CT-Bildern wurde für die exakt bestimmte Position der Kleinproben die mittlere Holzdichte auf dem entsprechenden Transsekt ausgelesen.

2.4.2. Ergebnisse

2.4.2.1 Variation der Holzdichte und Holzfeuchte bei der Kastanie

Insgesamt wurden ca. 8300 Kleinproben für Kastanie, Eiche und Robinie in die Analyse einbezogen. **Tab. 18** sowie die Abbildungen 49 bis 51 zeigen die breite Variation der gemessenen Kennwerte. Es wird deutlich, dass durch die Trocknung und den Wasserverlust die Holzdichte der darrtrockenen Proben deutlich unter der Holzdichte aus der CT-Bestimmung liegt, die an waldfrischen Proben ermittelt wurde. Die Differenz liegt bei ca. 0,33 g/cm³. Damit liegt die Dichte des frischen Holzes bei der Kastanie im Mittel bei 38% über der Dichte im darrtrockenen Zustand.

Tab. 18: Deskriptive Statistik – Holzfeuchte, Holzdichte darr und Holzdichte (CT) für die Kastanie (Kleinproben)

	N	Min.	Max.	Mittelwert	Standard-fehler	Standardab-weichung	Varianz	Schiefe	Standard-fehler
Holzfeuchte [%]	3756	36	177	91	0,00340	0,20848	0,043	0,343	0,040
Holzdichte darr [g/cm³]	3756	0,370	0,805	0,5268	0,000911	0,055826	0,003	0,176	0,040
Holzdichte (CT) [g/cm3]	3756	0,505	1,139	0,8637	0,001821	0,111616	0,012	-0,201	0,040

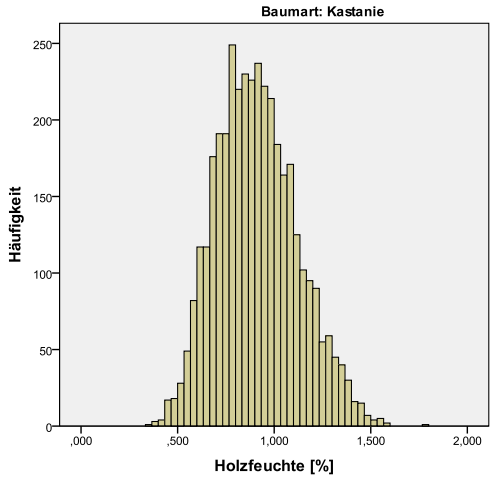

Abb. 51: Variation der Holzfeuchte bei der Kastanie

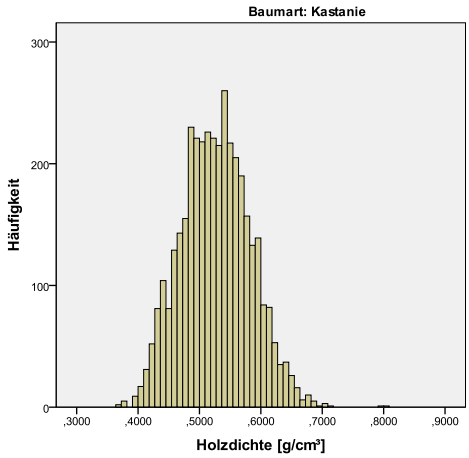

Abb. 52: Variation der Holzdichte (darr) bei der Kastanie

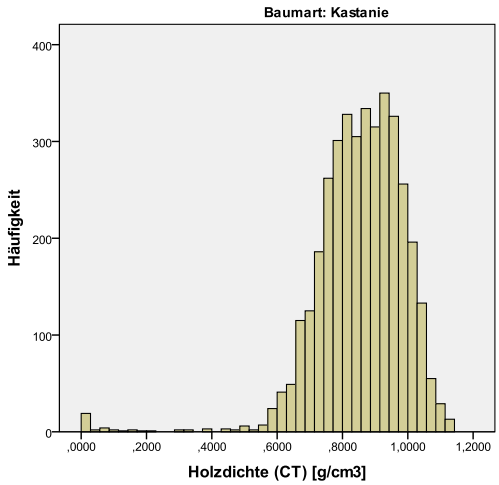

Abb. 53: Variation der Holzdichte (CT) bei der Kastanie

Innerhalb und zwischen einzelnen Bäumen besteht eine große Heterogenität, sowohl hinsichtlich der Holzfeuchtigkeit als auch hinsichtlich der Holzdichte (darr) und der aus den CT scans abgeleiteten Holzdichte (frisch). Die Variation ist in den **Abb. 54** bis **Abb. 56** dargestellt.

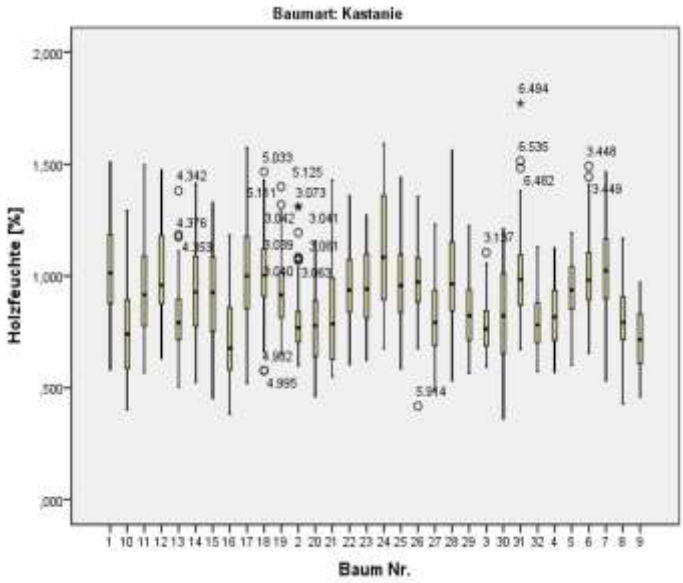

Abb. 54: Variation der Holzfeuchte je Einzelbaum bei der Kastanie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

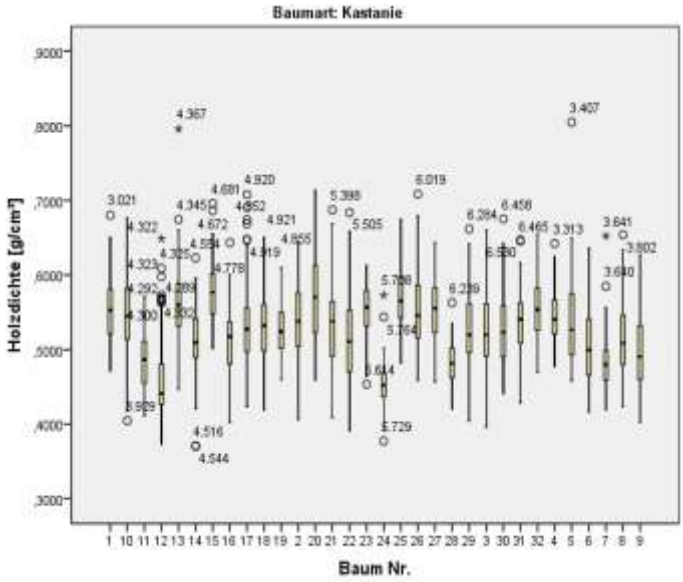

Abb. 55: Variation der Holzdichte je Einzelbaum bei der Kastanie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

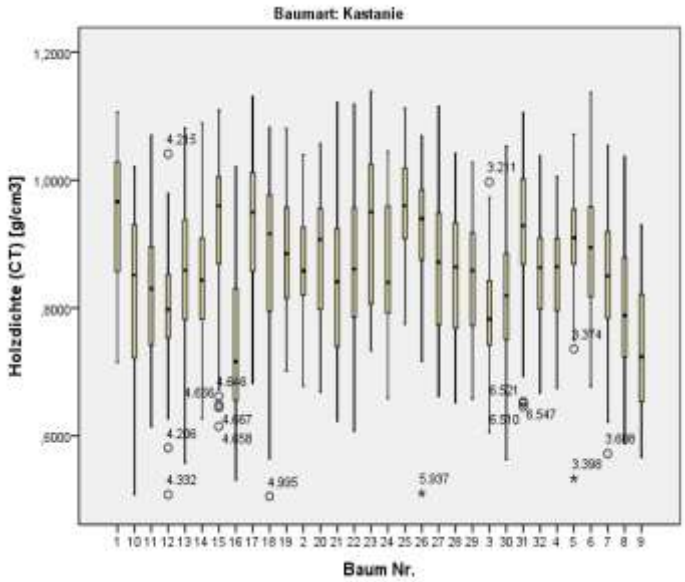

Abb. 56: Variation der Holzdichte (CT) je Einzelbaum bei der Kastanie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

Innerhalb des Stammes besteht sowohl für die Holzdichte, als auch für die Holzfeuchte eine gerichtete Veränderung vom Mark zur Rinde (**Abb. 57** und **Abb. 58**). Es ist deutlich erkennbar, dass sowohl Holzfeuchte als auch die Holzdichte des waldfrischen Holz von innen nach außen zunehmen. An der Peripherie bleiben die Holzfeuchte als auch die Holzdichte in etwa konstant.

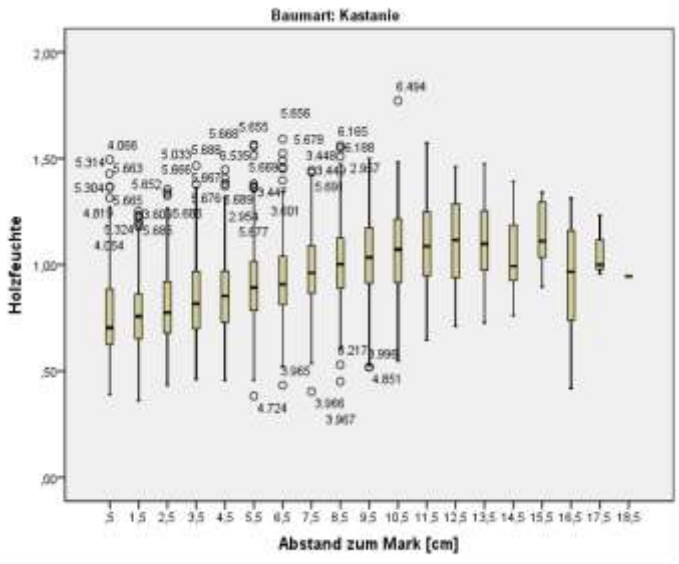

Abb. 57: Variation der Holzfeuchte mit Abstand zum Mark bei der Kastanie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil)

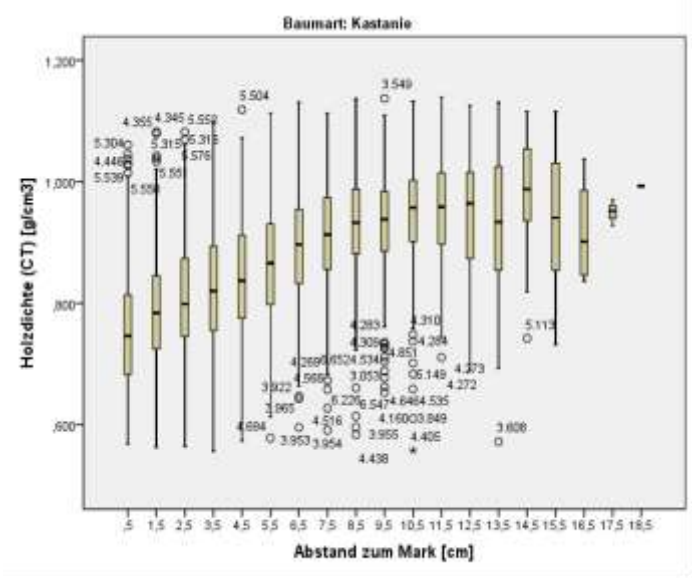

Abb. 58: Variation der Holzdichte (CT) mit Abstand zum Mark bei der Kastanie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil)

2.4.2.2 Variation der Holzdichte und Holzfeuchte bei der Eiche

Tab. 19 sowie die **Abb. 59** bis **Abb. 61** zeigen für die Eiche ebenfalls eine große Variation der gemessenen Kennwerte wie für die Kastanie. Insgesamt liegt die Holzfeuchte jedoch niedriger als bei der Kastanie, die Holzdichte der darrtrockenen Proben jedoch höher. Die Differenz zwischen darrtrockener Holzdichte und Holzdichte (CT-Messung des waldfrischen Holzes) ist geringer als bei der Kastanie und liegt im Mittel bei ca. 0,24 g/cm³. Insgesamt spiegelt sich so die geringere Holzfeuchte wider.

Tab. 19: Deskriptive Statistik – Holzfeuchte, Holzdichte darr und Holzdichte (CT) für die Eiche (Kleinproben)

	N	Min.	Max.	Mittelwert	Standard-fehler	Standardab-weichung	Varianz	Schiefe	Standard -fehler
Holzfeuchte [%]	2736	0,24	1,35	0,6346	0,00187	0,09801	0,010	-0,826	0,047
Holzdichte darr [g/cm³]	2798	0,375	1,022	0,69208	0,001253	0,066264	0,004	-0,354	0,046
Holzdichte (CT) [g/cm3]	2814	0,511	1,189	0,93007	0,001550	0,082220	0,007	-0,899	0,046

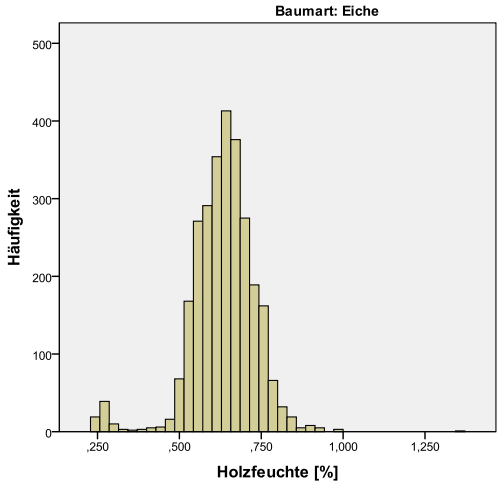

Abb. 59: Variation der Holzfeuchte bei der Eiche

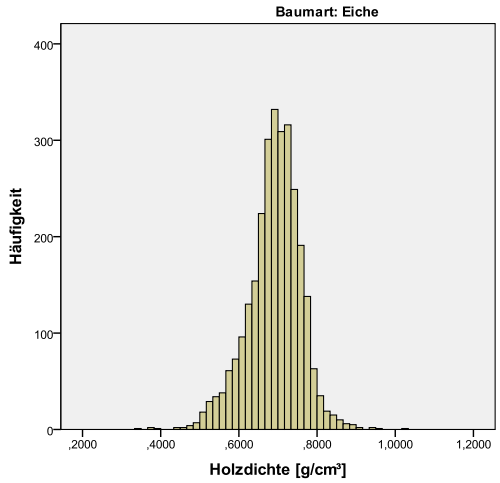

Abb. 60: Variation der Holzdichte (darr) bei der Eiche

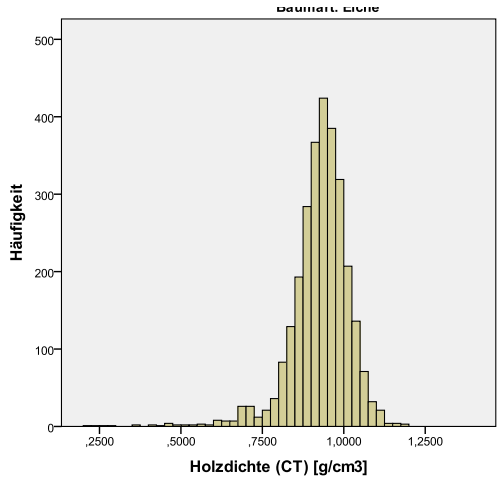

Abb. 61: Variation der Holzdichte (CT) bei der Eiche

Innerhalb und zwischen einzelnen Bäumen besteht wie bei der Kastanie ebenfalls eine große Heterogenität bezüglich Holzfeuchtigkeit, und Holzdichte. Diese ist in den **Abb. 62** bis **Abb. 64** dargestellt.

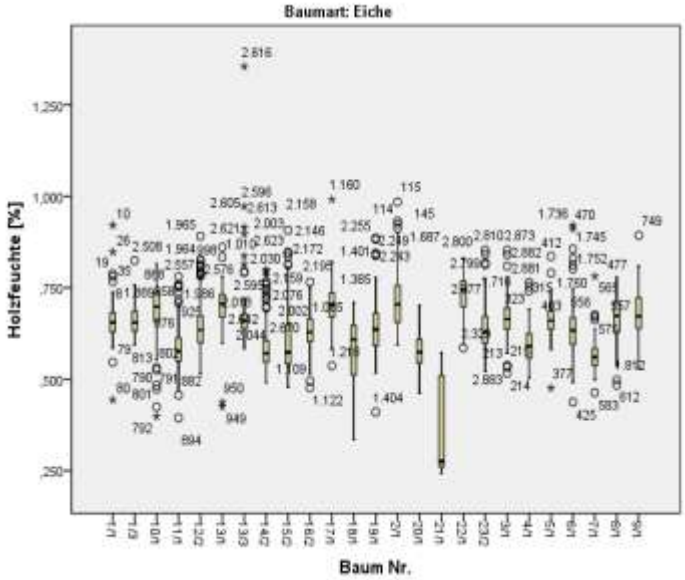

Abb. 62: Variation der Holzfeuchte je Einzelbaum bei der Eiche (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

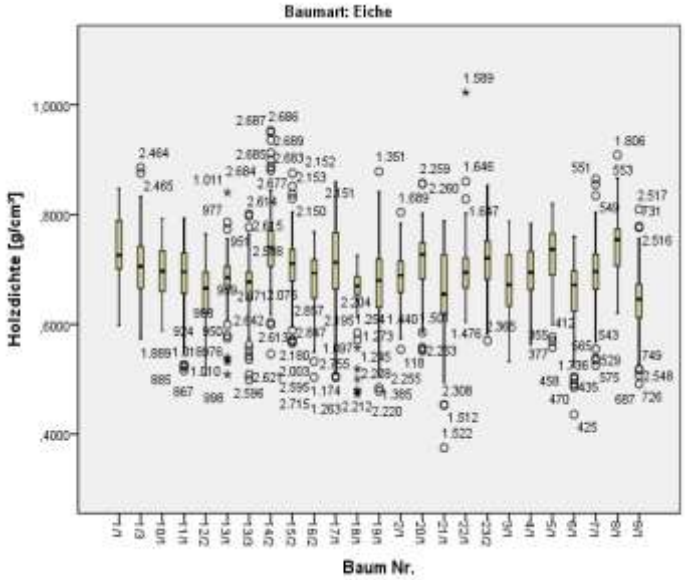

Abb. 63: Variation der Holzdichte (darr) je Einzelbaum bei der Eiche (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

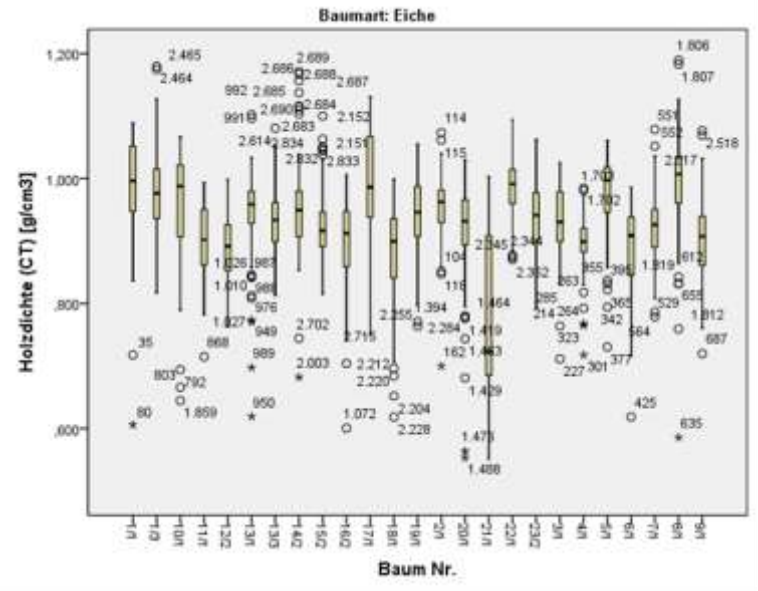

Abb. 64: Variation der Holzdichte (CT) je Einzelbaum bei der Eiche (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

Auch bei der Eiche wird deutlich, wie stark die Holzdichte und die Holzfeuchte zwischen den Bäumen variiert. Eine Bestimmung der Dichte aus CT-Messung muss darum dieser Variation Rechnung tragen.

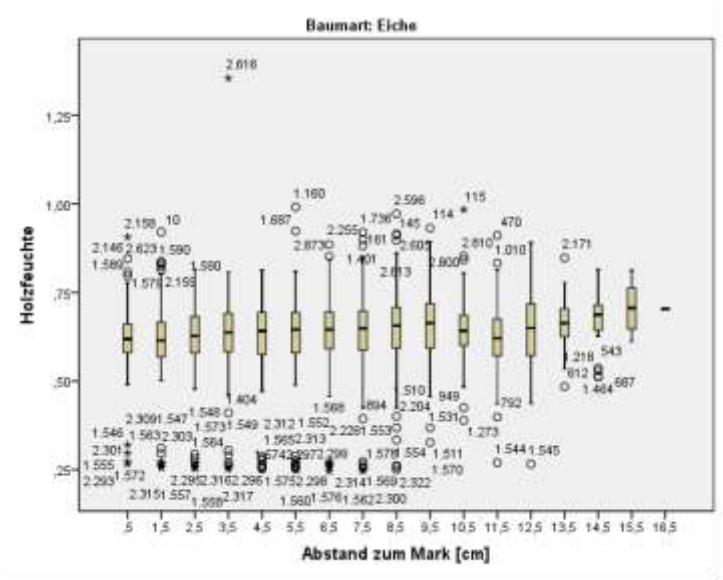

Abb. 65: Variation der Holzfeuchte mit Abstand zum Mark bei der Eiche (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

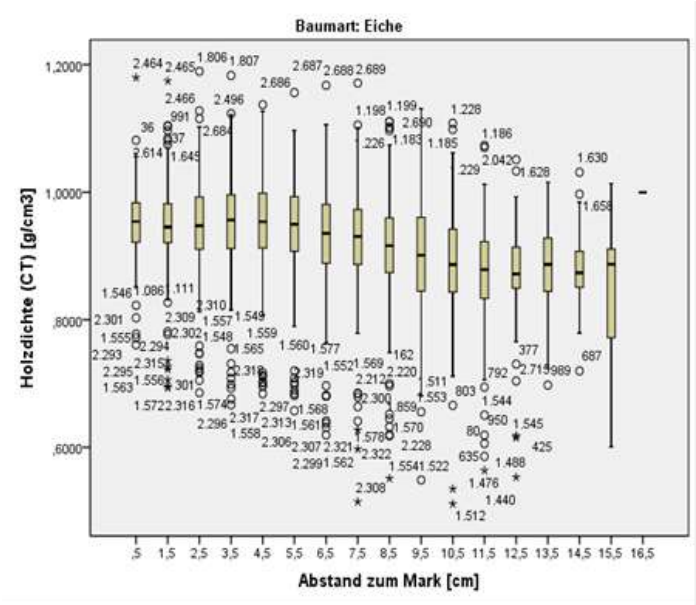

Abb. 66: Variation der Holzdichte (CT) mit Abstand zum Mark bei der Eiche (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

Deutlich wird auch für die Eiche eine Abnahme der Holzdichte (in breiter Streuung) über dem Querschnitt vom Mark zur Rinde (**Abb. 66**). Die Holzfeuchte erscheint für die Eiche über dem Querschnitt im Mittel konstant, jedoch auch in breiter Streuung (**Abb. 65**).

2.4.2.3 Variation der Holzdichte und Holzfeuchte bei der Robinie

Tab. 20 sowie die Abbildungen 61 bis 63 zeigen wie die Kastanie und die Eiche die breite Variation der gemessenen Kennwerte. Insgesamt liegt die Holzfeuchte jedoch noch niedriger als bei den beiden anderen Holzarten, die Holzdichte der darrtrockenen Proben jedoch wiederum höher.

Tab. 20: Deskriptive Statistik – Holzfeuchte, Holzdichte darr und Holzdichte (CT) für die Robinie (Kleinproben)

	N	Min.	Max.	Mittelwert	Standard-fehler	Standard-abweichung	Varianz	Schiefe	Standard-fehler
Holzfeuchte [%]	1530	0,190	1,39	0,4358	0,00243	0,09516	0,009	2,684	0,063
Holzdichte [g/cm³]	1696	0,397	1,141	0,70661	0,00187	0,07698	0,006	-0,058	0,059
Holzdichte (CT) [g/cm^3]	1712	0,521	1,203	0,82703	0,00229	0,09485	0,009	0,332	0,059

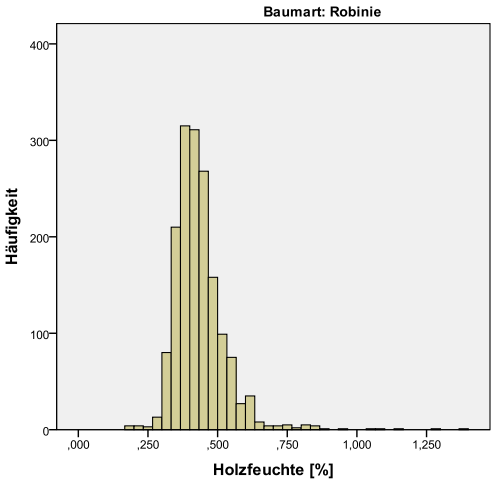

Abb. 67: Variation der Holzfeuchte bei der Robinie

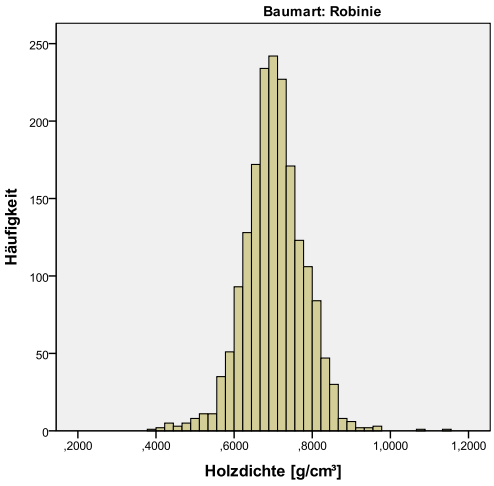

Abb. 68: Variation der Holzdichte (darr) bei der Robinie

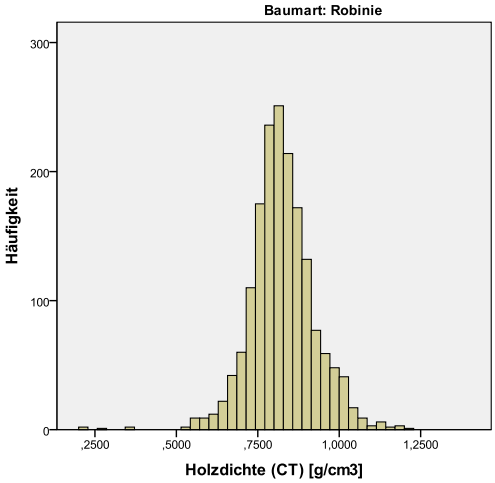

Abb. 69: Variation der Holzdichte (CT) bei der Robinie

Auch für die Robinie gilt wiederum die deutliche Streuung innerhalb der einzelnen Bäume und zwischen den einzelnen Individuen (**Abb. 70** bis **Abb. 72**).

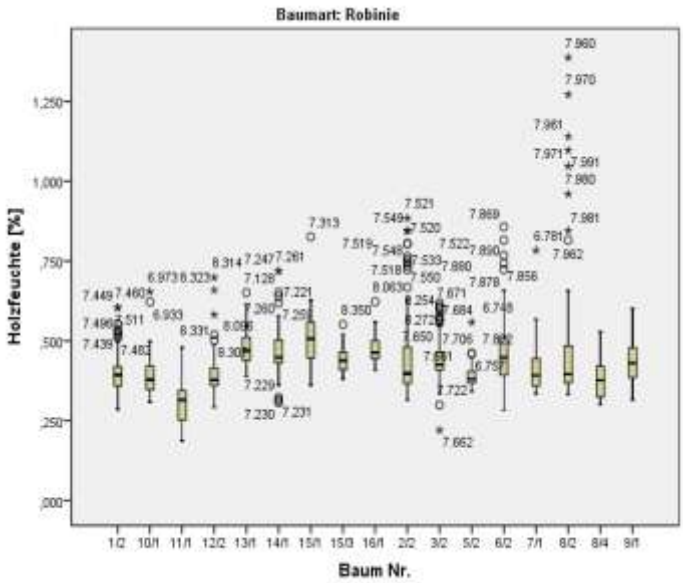

Abb. 70: Variation der Holzfeuchte je Einzelbaum bei der Robinie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

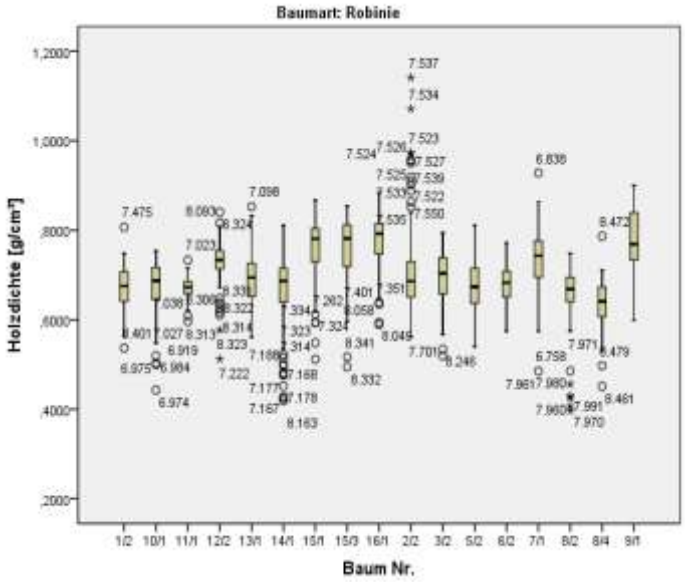

Abb. 71: Variation der Holzdichte (darr) je Einzelbaum bei der Robinie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

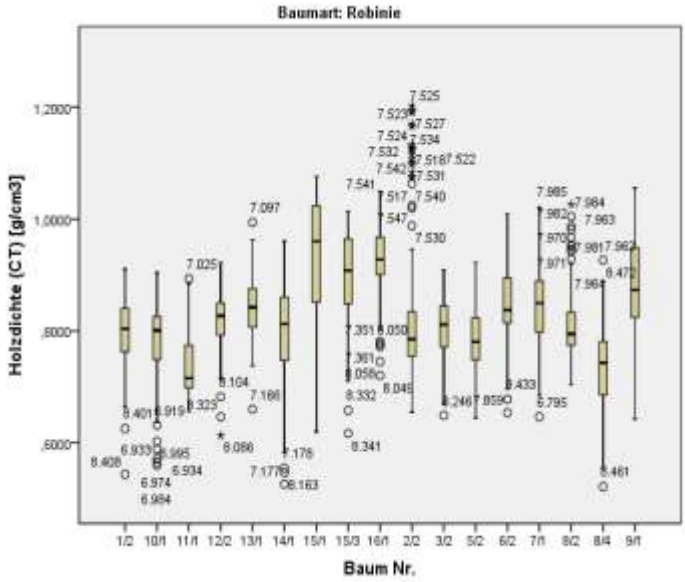

Abb. 72: Variation der Holzdichte (CT) je Einzelbaum bei der Robinie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil, Extrema, Ausreißer)

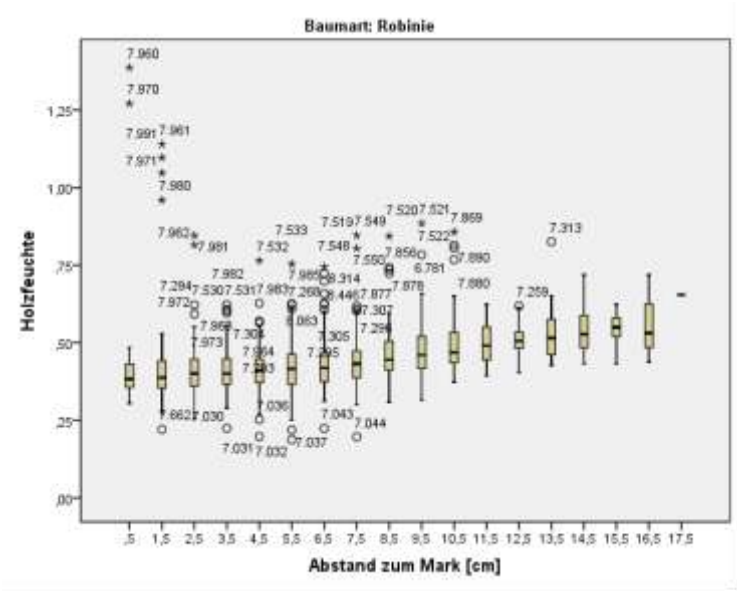

Abb. 73: Variation der Holzfeuchte mit Abstand zum Mark bei der Robinie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil)

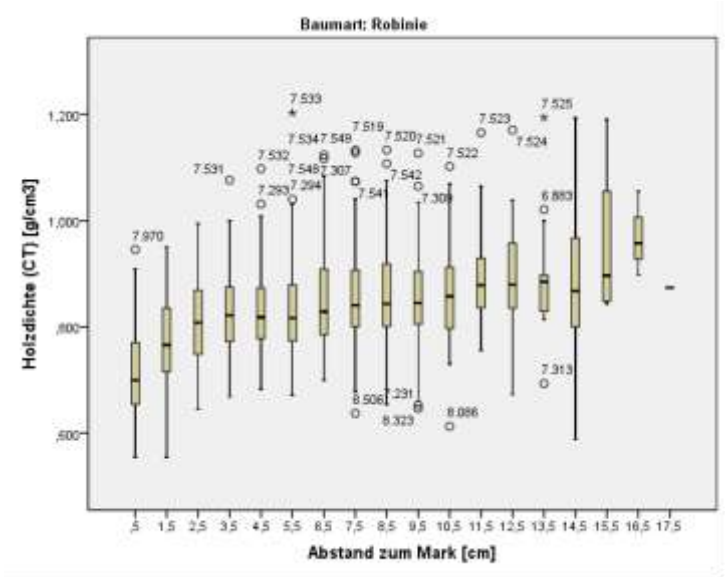

Abb. 74: Variation der Holzdichte (CT) mit Abstand zum Mark bei der Robinie (Boxplot: Median, oberes und unteres Quartil)

Im Gegensatz zu den beiden anderen Holzarten Eiche und Kastanie zeigt die Robinie sowohl für die Holzfeuchte als auch für die Holzdichte (CT) einen gegenläufigen Trend in der Veränderung vom Mark zur Rinde. Hier erscheint sowohl Holzfeuchte als auch Dichte des waldfrischen Holzes vom Stamminneren zum Stammäußeren anzusteigen.

2.5. DISKUSSION

Die in dieser Studie erprobten Methoden zur Erkennung innerer Holzmerkmale wie Rinde, Splint- und Kernholz von Kastanie, Eiche und Robinie sind viel versprechend und lieferten sehr gute bis zufrieden stellende Ergebnisse. Bisher gängige Verfahren zur Erkennung innerer Holzmerkmale konzentrieren sich überwiegend auf die Hounsfieldwerte und versuchten mittels Pixel-basierter Klassifizierungsverfahren (GRUNDBERG & GRÖNLUND 1991, 1992, LONGUETAUD ET AL 2007, WEI ET AL 2008, BRÜCHERT ET AL. 2010) oder künstlicher neuraler Netzwerke (SCHMOLDT ET AL. 1996, 1998, 2000A, HE 1997) die unterschiedlichen Holzmerkmale zu erkennen. Die hier untersuchten Holzarten weisen jedoch meist nur sehr geringe Unterschiede in der Dichte der zu untersuchenden Holzmerkmale auf, so dass die bisher gängigen Verfahren hier nicht angewendet werden konnten. Das nun hier vorgestellte Verfahren konzentriert sich daher nicht direkt auf die Hounsfield Werte der jeweiligen Holzmerkmale sondern auf typische, wiederkehrende Muster entlang des radialen Verlaufs der untersuchten Stämme und speziell an den Übergängen zwischen den Merkmalen.

Für die Entwicklung dieses Verfahrens wurden jeweils sieben Stammscheiben je Baumart mithilfe von CT- und Mikroskopmessungen untersucht. Die unter dem Mikroskop gemessenen Grenzen zwischen den Holzmerkmalen wurden auf das CT-Bild übertragen. Somit konnten charakteristische Muster erkannt und ausgewertet werden.

Ausgehend von den Referenzmessungen wurden im Anschluss entsprechende Algorithmen zur Erkennung von Rinde, Splint- und Kernholz für die jeweiligen Baumarten entwickelt und an den vermessenen Stammscheiben erprobt. Zur Erreichung des bestmöglichen Ergebnisses wurde zudem eine Versuchsreihe gestartet, bei der eine Vielzahl unterschiedlicher Parametereinstellung für die entwickelten Algorithmen getestet wurden.

Mit Hilfe der entwickelte Verfahren konnten die Grenzen zwischen Rinde und Splintholz sehr genau bestimmt werden. Für die Kastanie lag die mittlere Abweichung für die Rinden-Splintholz Grenze bei -0.076 mm (± 2,36 mm) und für die Splintholz Kernholzgrenze bei -0,3 mm (± 2,7 mm). Die Ergebnisse für Eiche waren ähnlich, jedoch mit einer höheren Streuung. Hier lag die mittlere Abweichung für die Rinden-Splintholz Grenze bei -0.007 mm (± 4,5 mm) und für die Splintholz Kernholzgrenze bei 0,18 mm (± 7,6 mm). Auf Grund von Problemen mit dem Untersuchungsmaterials konnten für die Robinie keine Referenzmessungen durchgeführt werden. Dem Augenschein nach, waren die Ergebnisse zur Rindenerkennung jedoch zufrieden stellend. Es gelang jedoch nicht, Splint und Kernholz der Robinie im CT-Bild zu unterscheiden.
Die so entwickelten und getesteten Erkennungsverfahren wurden im Anschluss an 101 ca. fünf Meter langen Stammabschnitten der Kastanie sowie 45 Eichen und 30 Robinien Abschnitten gleicher Länge angewandt. Als Ergebnis lagen für diese Abschnitte die Form und das Volumen der Abschnitte mit und ohne Rinde sowie deren Splint und Kernholz Anteil (außer Robinie) vor. Diese Ergebnisse gingen zum einen in eine Versuchsreihe am KIT zur Drucktragfähigkeit der Baumarten ein, zum anderen wurde mit Hilfe der ermittelten Volumen mittels Modellberechungen Gesetzmäßigkeiten zur Rindenstärke berechnet.
Im Folgenden sollen die Stärken und Schwächen des entwickelten Verfahrens näher beleuchtet werden sowie Rückschlüsse aus den Untersuchungsergebnissen gezogen werden.

2.5.1. Referenzmessung

Mit Hilfe der Referenzmessungen mit Mikroskop war es möglich, die Grenzen zwischen den unterschiedlichen Holzmerkmalen eindeutig auf den CT-Bildern zu identifizieren. Die Einschnitte in den Stammscheiben waren gut auf den CT-Bildern zu erkennen, so dass die Vermessung im Bild als auch auf der Stammscheibe problemlos durchführbar war.
Einige Einschränkungen mussten jedoch beachtet werden:
- Durch die Dicke der Einschnittskerbe (ca 1 cm) ist die Messung nicht exakt radial, sondern um wenige Millimeter vom Mark versetzt.
- Durch die Tiefe der Einschnittskerbe liegen die Messung auf der Stammscheibe und die Messung auf dem CT-Bild nicht exakt auf der gleichen Position in Längsrichtung. Die Messung im CT-Bild ist einige Slices tiefer in der Stammscheibe.
- Im ungünstigen Fall kann das Holz an der Kreuzung der Schnittfugen splittern, so dass der Ausgangspunkt nur indirekt durch gedachte Verlängerung der Schnittfugen bestimmt werden kann.
- Der Feuchtegrad der Stammscheiben verändert sich mit zunehmender Trocknung. Dies hat zum einen Auswirkung auf das CT-Bild als auch auf das Volumen der Stammscheibe selbst. Zudem löst sich die Rinde bei zunehmender Trocknung, so dass Rinde zwischen den Arbeitsschritten abblättern kann, was die Messungen erschwert.
Die oben genannten Einschränkungen wirken sich nicht sonderlich auf die Genauigkeit der Referenzmessungen auf, sofern bei der Vorbereitung und Durchführung der Messungen mit Sorgfalt vorgegangen wird.
Die Dicke der Kerbe und die somit nicht exakt radiale Messung ist letztendlich unerheblich. Bei der Referenzmessung wird nicht die Stärke der Rinde vermessen, sondern die Position des Kamibiums bzw. die Verkernungsgrenze auf einer Linie im Bild und auf der Stammscheibe. Die Stärke der Schnittfuge ist daher sogar von Vorteil, da somit zwei Messungen ober- und unterhalb der Fuge durchgeführt werden können.
Größeren Einfluss hat die Verschiebung der Messung um einige Slices in die Stammscheibe auf Grund der Tiefe des Einschnittes. Slices, auf denen die Schnitte noch zu erkennen sind, können nicht für die Referenzmessungen verwendet werden, da hier die entscheidenden Bereiche durch die Fuge beeinträchtigt wurden. Die entsprechenden CT-Bilder ohne Fuge liegen daher einige Slices (in dieser Versuchsreihe ca. 6-8 Slices) tiefer als die Mikroskopmessung. Im Regelfall variiert die Rindenstärke sowie die Verkernungsgrenze über diese Distanz nicht signifikant, so dass dieser Fehler toleriert werden kann, es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Stammscheibe waagerecht zur Längsachse des Stammes entnommen wurde, dass die beiden Schnittflächen der Scheibe parallel zu einander stehen und dass während

des Scanvorgangs im CT die Scheibe im Rechtenwinkel zur Bewegungsrichtung des Scanners ausgerichtet ist. Jede Abweichung hiervon erhöht mögliche Fehler während den Messungen.
Auch bei exakt ausgerichteter Stammscheibe kommt es vor, dass vor allem bei schuppiger Borke die Rindenstärke schon bei wenigen Millimeter Versatz in der Tiefe deutliche variiert. Dies beeinflusst jedoch die Referenzmessungen nicht, da der Verlauf des Kambiums weiterhin gleichmäßig, ohne deutliche Sprünge verläuft. Die Äußere Grenze bei der die Borke auf die Luft trifft, sind in der Regel, auf den CT-Bildern auch ohne Referenzmessung zu erkennen.
Durch die Absplitterung von Holz im Bereich der Kreuzung der Schnittfugen, kann der Null-Punkt für die Messlinien nicht immer genau bestimmt werden. Dies führt zu Abweichungen zwischen Messungen unter dem Mikroskop und am CT-Bild. Da jedoch ausgehend von dem Null-Punkt in zwei Richtungen gemessen wird erhöht sich somit lediglich die Streuung der Messergebnisse, nicht aber die mittlere Abweichung.
Der gleiche Frischegrad der Stammscheibe unter Mikroskop und auf dem CT-Bild ist entscheidet für die Referenzmessung. Liegt zu viel Zeit zwischen den beiden Aufnahmepunkte, kann sich die Scheibe verformen oder Rinde abblättern, so dass die Ergebnisse verfälscht werden. Um diesem vorzubeugen ist es daher zu empfehlen, die Scheiben zwischen den Messvorgängen in einer Plastiktüte kühl zu lagern. Somit behält sie weitestgehend ihren Frischegrad.

2.5.2. Erkennungsverfahren

Die in dieser Studie entwickelten Erkennungsverfahren verfolgen einen neuen Ansatz. Anders als bei bisher gängigen Verfahren wird der radiale Verlauf der Housfield Werte im äußeren Bereich der Stammscheibe/ Slice untersucht. Für die jeweiligen Baumarten konnten charakteristische Kurven im Übergang von Rinde zum Splintholz erkannt werden. Allein durch Ermittlung von Extrem- und Wendepunkten dieser Kurven konnten Rückschlüsse auf die Lage der Grenze zwischen den Merkmalen getroffen werden. Die tatsächlichen Hounsfield Werte waren für die Erkennung unerheblich.
Da nicht mit Schwellwerten gearbeitet wurde, war die Identifizierung von Rindenschäden sowie auswachsenden, abgesägten Ästen entscheidend für eine erfolgreiche Erkennung der Rinden-Splintholzgrenze. In diesen Fällen ist keine Rinde vorhanden, ähnliche Strukturen im radialen Verlauf der Housfieldwerte können aber auch im Splint- und Kernholz gefunden werden. Daher müssen die Stellen am Stamm, an denen keine Rinde vorhanden ist oder sich die Rinde ablöst, maskiert werden,
Rindenschäden und auswachsende Äste wurden mittels einer Analyse der Stammoberfläche in vertikaler und horizontaler Richtung ermittelt. Auswachsende, abgesägt Äste wurden durch signifikante, sprunghafte Vergrößerungen der Distanz der Stammaußenseite zur Markröhre erkannt. Probleme bereiten bisher jedoch noch großflächig fehlende Rinde. Diese werden nicht zuverlässig erkannt. Stattdessen wird eine der äußere Bereich des Splintholzes als Rinde identifiziert.
Signifikante, sprunghafte Verringerungen der Distanz der Stammaußenseite zur Markröhre wurden als fehlende Rindenteile identifiziert. Sich ablösenden Rinde konnte anhand der Lücke zwischen Stamm und abstehender Rinde identifiziert werden.
Sowohl für Kastanie als auch für Eiche ließen sich die Ansätze zur Erkennung der Rinden-Splintholzgrenze sowie zur Erkennung von Rindenschäden und auswachsenden Ästen problemlos anwenden. Lediglich für Robinie, die eine deutlich heterogenere Rindenstruktur hatte, musste die Ansätze zur Erkennung der Rinden-Splintholzgrenze sowie zur fehlenden Rinde leicht modifiziert werden.
Bast und Borke der Robinie unterscheiden sich deutlich auf den CT-Bild. Während Borke eine niedrige, sehr homogene Dichte aufweist, sind die Grauwerte des Basts deutlich höher. Die niedrige, homogene Dichte der Borke bietet sich für den Einsatz von Schwellwerten an. Mit der Hilfe der Schwellwerte kann zum einen die schuppige Struktur der Borke geglättet werden. Andernfalls auftretende Probleme der Unterschiedlichen Distanz der Rinden - Splintholzgrenze zur Stammaußenseite können so umgangen werden. Gleiches gilt für die Erkennung von fehlender Rinde. Durch die schuppige Struktur der Rinde greift der Ansatz der Suche nach sprunghaften Veränderungen der Distanz der Stammaußenseite zur Markröhre nicht mehr. Durch die Schwellwertsetzung können Partien, bei der die innere und äußere Grenze identisch sind, leicht identifiziert und entsprechend als fehlende Rinde maskiert werden.

Für die Erkennung der Splintholz- Kernholzgrenze der Eiche wurde ein weiterer Ansatz verwendet. Dabei wurde auf ein einfaches Klassifizierungsverfahren, dem Graph-Cut- Verfahren zurückgegriffen. Mit diesem Verfahren kann das zu analysierende Bild in zwei zusammenhängende Bereiche eingeteilt werden. Eingangswerte für die Klassifizierung sind Bereiche in denen die zwei Klassen sicher bzw. mit großer Wahrscheinlichkeit anzutreffen sind sowie die zu diesen Bereichen gehörenden Farb- und Kontraststatistiken.
Die für die drei Baumarten entwickelten Verfahren wurden mit Hilfe der für die Referenzmessung präparierten Stammscheiben getestet und solange modifiziert, bis zufrieden stellende Ergebnisse vorlagen. Die Lage der Grenzwerte entlang der Kurven lässt sich mittels Parameter, die dem Programm übergeben werden, manipulieren. In einem zweiten Durchlauf wurden ausgehend von den zuvor ermittelten Defaultwerten mehrere tausend Kombinationen dieser Parameter durchgespielt, und die besten Ergebnisse als neue Defaultwerte übernommen (siehe unten, Punkt 2.5.3).
Wie bereits anfänglich erwähnt, waren die für Stammscheiben für die Referenzmessungen der Robinie nicht mit dem zu untersuchenden Stammmaterial vergleichbar. Die vorliegenden Stammscheiben waren entweder zu trocken oder zu frisch, so dass die für das Untersuchungsmaterial der Robinie entwickelten Erkennungsverfahren nicht mittels Referenzmessungen auf ihre Genauigkeit untersucht werden konnten.
Das Problem der nicht möglichen Referenzmessungen lässt zukünftige Herausforderungen bezüglich der Erkennungsverfahren innerer Holzmerkmale erahnen. Der frische Grad des zu untersuchenden Materials kann die Darstellung der Merkmale im CT-Bild maßgeblich beeinflussen. Im vorliegenden Fall der Robinie machte sich dies durch den unterschiedlichen Feuchtegehalt von Splintholz und Bast bemerkbar. Während in dem frisch geschlagenen Holz eine erhöhte Feuchte im Splintholz erkennbar war, konnte diese bereits nach einigen Monaten Lagerung nicht mehr nachgewiesen werden. Nach weiterer Lagerung konnte auch ein erhöhter Feuchtegrad des Bastes nicht mehr eindeutig bestimmt werden.
Nicht nur die Lagerzeit des Holzes, auch der Zeitpunkt des Einschlages kann Einfluss auf den Feuchtegrad von Splint und Rinde haben. So untersuchte Sachsse (1996) den Holzfeuchtegehalt von Pappeln. Diese variierte im Laufe eines Jahres im jüngeren, funktionstüchtigen Baste relativ stark, im älteren Bast wenig und in der Borke kaum.
Auch aus anderen Untersuchungen in Jahresgang, ist bekannt, dass Bäume in den unterschiedlichen Jahreszeiten einen unterschiedlichen Feuchtegehalt aufweisen können. Zudem zeigen weitere Untersuchungen, dass die Holzdichte insbesondere auch stark mit der waldwachstumskundlichen Behandlung schwanken kann.
Die in dieser Studie entwickelten Verfahren lassen sich daher mit der ermittelten Genauigkeit nur auf Material anwenden, dass in Wuchsgebiet, Einschlagzeitpunkt und Lagerzeit vergleichbar mit dem hier verwendeten Material ist. Über die Genauigkeit bei abweichendem Versuchsmaterial lässt sich bisher mangels fehlender Stammproben keine Aussage treffen.

2.5.3. Optimierung

Mit Hilfe des Optimierungsverfahrens wurden die passendsten Parametereinstellungen für die Erkennung der unterschiedlichen Holzmerkmale für Kastanie und Eiche gesucht. Aufgrund der fehlenden Referenzmessungen der Robinie entfiel dieser Schritt bei der Baumart.
Die zu optimierenden Parameter für die Erkennung der Rinde für Kastanie und Eiche sowie zur Erkennung des Splintholzes der Kastanie waren die Anzahl der Eingangswerte für die Kurvenanalyse, der Abstand des Grenzpunktes vom Wende- bzw. Extrempunkt sowie der Schwellwert für Luft.
Für die Erkennung der Splintholz- Kernholzgrenze der Eiche waren die zu optimierenden Parameter der Schwellwert für Luft, der Bereich, welcher sicher kein Kernholz ist, der prozentuale Bereich, der wahrscheinlich Kernholz ist, sowie der prozentuale Bereich, der sicher Kernholz ist.
Durch die Optimierung der Parameter konnten leichte Verbesserungen gegen gegenüber den ursprünglich ermittelten default Werten erzielt werden.
Zur Bewertung der Ergebnisse wurde die Abweichung der gefunden Grenzen zu den Referenzmessungen ermittelt und über alle Messungen der Mittelwert, der Median sowie die Standartabweichung dieser

Differenz berechnet. Anschließend wurden den ermittelten statistischen Werte der Größe nach sortiert und entsprechende Ränge vergeben, wobei der jeweils kleinste Wert den besten Rang erhielt.
Als beste Parametereinstellung wurde anschließend diejenige ausgewählt, bei der die kleinste Summe der Ränge für alle statistischen Werte erzielt wurde. Bei der Auswertung wurde deutlich, dass für die optimale Erkennung der einzelnen Merkmale unterschiedliche Grundeinstellungen (z.B. für den Schwellwert von Luft oder der Anzahl der zu verwendenden Eingangswerte) vorzunehmen sind. Dies hat vor allem für die Kastanie Auswirkungen. Das für diese Baumart entwickelte Verfahren ermöglicht es zwar, in einem Durchlauf sowohl die Rinden- Splintholzgrenze als auch die Splintholz- Kernholzgrenze zu erkennen. Eine gemeinsame Erkennung beider Merkmale in einem Durchlauf ergibt jedoch deutlich unpräzisere Ergebnisse für das ein oder andere Merkmal als zwei separat durchgeführte Messungen.
Für die Kastanie wichen die so ermittelten Grenzwerte für die Rinden-Splintholzgrenze im Mittel um -0.076 mm +- 2.363 mm von den Referenzmessungen ab. Der Median lag bei -0,152 mm. Die Abweichung von den Referenzmessungen von der Splintholz- Kernholz lagen bei -0,345 mm +- 2,707 mm. Der Median lag bei -0,543 mm.
Für die Eiche war die Ergebnisse ähnlich, jedoch war die Streuung der Werte größer. Die Abweichungen der Rinden-Splintholzgrenze von den Referenzmessungen waren im Mittel -0,007 mm +- 4,572 mm bei einem Median von 0,047 mm. Die Messungen der Splintholz- Kernholzgrenze wichen im Mittel um 0,182mm +- 7,683mm mit einem Median von 1,101 mm von den Referenzmessungen ab.
Die starke Streuung, besonders bei der Eiche zeigt, dass das Verfahren noch verfeinert werden sollte.

2.5.4. Schlussfolgerungen

Der neue Ansatz ist vielversprechend, und zeigt insbesondere in Zusammenschau mit den Ergebnissen der Druckfestigkeitsprüfung (Projektteil KIT), der Ansatz zu sehr befriedigenden Ergebnissen führt. Der Ansatz, für die verschiedenen Holzarten jeweils angepasste Erkennungsmodelle zu entwickeln und die Eingangsparameter zu optimieren hat zu einer präzisen Erkennung des Holzkörpers geführt. Gerade für die Rindenerkennung ist dieser Ansatz gut anwendbar, da die Position der Rinde eindeutig ist und diese nicht irgendwo am Stamm auftreten kann. Zudem ist die Unterscheidung, um welche Holzart es sich handelt, und welcher Algorithmus angewendet werden sollte bereits durch visuelle Ansprache der Abschnitte möglich.
Referenzmessungen belegen gute Eignung. Es muss jedoch auf das Material geachtet werden. Zur sicheren Vorhersage der Holzfeuchte, um daraus die Holzdichte für die Drucksimulation herzuleiten, ist jedoch noch eine breitere Datenbasis notwendig.

2.6. LITERATUR

ALTHERR, E.; UNFRIED, P.; HRADETZKY, J.; HRADETZKY, V. (1974): Statistische Rindenbeziehungen als Hilfsmittel zur Ausformung und Aufmessung unentrindeten Stammholzes, Teil I: Kiefer, Buche, Hainbuche, Esche und Roterle. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 61, Freiburg, Deutschland, 1 – 137

ALTHERR, E.; UNFRIED, P.; HRADETZKY, J.; HRADETZKY, V. (1976a): Statistische Rindenbeziehungen als Hilfsmittel zur Ausformung und Aufmessung unentrindeten Stammholzes, Teil II: Europäische Lärche, Schwarzkiefer, Stieleiche, Traubeneiche, Roteiche, Bergahorn und Linde. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 78 , Freiburg, Deutschland, 1 – 201

ALTHERR, E.; UNFRIED, P.; HRADETZKY, J.; HRADETZKY, V. (1976b): Statistische Rindenbeziehungen als Hilfsmittel zur Ausformung und Aufmessung unentrindeten Stammholzes, Teil III: Weymouthskiefer, Robninie, Bergulme, Birke, Marilandica-Pappel und Robusta-Pappel. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 78 , Freiburg, Deutschland, 1-115

BLAß, H.J.; FRESE, M.; BRÜCHERT, F.; DIAZ-BAPTISTA, M.; SAUTER, U.H. (2010): Fachwerkträger aus Robinienholz – Initiativprojekt. Schlussbericht, Januar 2010

BJÖRKLUND, L. (1999). Identifying heartwood-rich stands or stems of Pinus sylvestris by using inventory data. Silva Fennica 33, 119-129

BORIANNE, P.; PERNAUDAT, R.; SUBSOL, G. (2011): Automated delineation of tree rings in x-ray computed tomography images of wood. 18th IEEE International Conference on Image Processing, 237-240

BRÜCHERT, F.; DIAZ-BAPTISTA, M.; SAUTER, U.H. (2010): Automated bark/ wood boundary detection in Robinia pseudoacacia L. using computer tomography. 14th Annual Meeting LERFoB/ LERMaB/ FobAwi/ FVA

FOURNIER, F.; GOULET, M. (1970): Propriétés physico-mécaniques de 1'écorce: Une etude bibliographique. Département d'Exploitation et Utilisation des Bois, Université Laval, Note de Recherches N° 7, Québec, 44 S.

GAUß C.F.: Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae. 2 Tle. Göttingen 1821-23. (Commentationes Societatis Regiae Scientiarum Gottingensis recentiores, classis mathematicae, Bd. 5.); Supplementum Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae. Göttingen 1826/28. (Commentationes Societatis Regiae Scientiarum Gottingensis recentiores, classis mathematicae, Bd. 6.); Anton Börsch; Paul Simon (Hrsg.): Abhandlungen zur Methode der kleinsten Quadrate von Carl Friedrich Gauss. In deutscher Sprache. Berlin 1887.

GRUNDBERG, S.; GRÖNLUND, A. (1991): Methods for reducing data when scanning for internal log defects. In Proceedings of the 4th International Conference on Scanning Technology in the Wood Industry, San Francisco, Calif. 28–29 October 1991. Luleå University of Technology, Luleå, Sweden

GRUNDBERG, S.; GRÖNLUND, A. (1992): Log scanning - extraction of knot geometry. In Proceedings of the 1st International Seminar/ Workshop on Scanning Technology and Image Processing on Wood, Skellefteå, Sweden. 30 August – 1 September 1992. Luleå University of Technology, Luleå, Sweden

HODGES, D.G.; ANDERSON, W.C., MCMILLIN, C.W. (1990): The economic potential of CT scanners for hardwood sawmills. Forest Products Journal 40, 65-69

KUPFERSCHMID, A. (2001): Holzkunde II Teil 4. Rindenkunde und Rindenverwertung. Professur für Holzwissenschaften. ETH Zürich. Quelle: http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:26434/eth-26434-04.pdf [zuletzt abgerufen am 16.05.2012]

LONGUETAUD, F.; MOTHE, F.; LEBAN, J.M. (2007): Automatic detection of the heartwood/sapwood boundary within Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) logs by means of CT images. Computer and Electronics in Agriculture 58, 100–111

METTE, H.J., KORELL, U. (1989): Richtzahlen und Tabellen für die Forstwirtschaft. VEB, Berlin

MORTENSEN, E.N.; BARRETT, W.A. (1998): Interactive Segmentation with Intelligent Scissors. Graphical Models and Image Processing. Volume 60, Issue 5, September 1998, 349–384

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW; C.D. (1980): Textbook of wood technology. 4. Aufl., McGraw-Hill Book Company, New York.

RICHTER, C. (2007): Holzmerkmale - Beschreibung der Merkmale - Ursachen - Vermeidung - Auswirkung auf die verwendung des Holzes - Technologische Anpassung. ISBN 978-3-87181-061-9. DRW- Verlag Weinbrenner GmbH & Co KG. Leinfelden-Echterdingen

RÖSSLER, G. (2008): Rindenanteil richtig bemessen. Forstzeitung, Wien, 119, 28

SCHMOLDT, D.L.; HE, J.; ABBOTT, A.L. (2000): Automated labelling of log features in CT imagery of multiple hardwood species. Wood and Fibre Science 32, 287-300

SCHMOLDT, D.L.; SCHEINMAN, E.; RINNHOFER, A.; OCCEÑA, L.G. (2000): Internal log scanning: research to reality. In: Proceedings of Annual Hardwood Symposium, Memphis, Tenn., 11–13 May 2000, 103-114

SELL, J.; SCHELL, G. (1988): Der Heizwert von Holz und seine Einflussfaktoren, Literaturauswertung und Zusatzuntersuchungen. EMPA, IP HOLZ, Report Nr. 115/18, 1-24

SIMPSON, W.T. (1993): Specific gravity, moisture content, and density relationship for wood. U.S. For. Serv. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-76

WAGENFÜHR, R. (1996): Holzatlas. Fachbuchverlag, Leipzig

Waldwirtschaft Schweiz (2010): Schweizer Handelsgebräuche für Rohholz, Ausgabe 2010. Zürich: Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, 2010. ISBN: 978-3-906703-23-7.

WATANABE, K.; LAZARESCU, C.; SHIDA, S.; AVRAMIDIS S. (2012): A Novel Method of Measuring Moisture Content Distribution in Timber During Drying Using CT Scanning and Image Processing Techniques. Drying Technology, 30, 256-262

WEI, Q.; LEBLON, B.; CHUI, Y.H.; ZHANG, S.Y. (2008): Identification of selected log characteristics from computed tomography images of sugar maple logs using maximum likelihood classifier and textural analysis. Holzforschung, 62, 441-447.[doi:10.1515/HF.2008.077].

WEI, Q.; LEBLON, B.; LA ROCQUE, A. (2011): On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review. Canadian Journal Forest Research, 41, 2120-2140

WEI, Y.; YU, H.; HSIEH, J.; CONG, W.; WANG, G. (2007): Scheme of computed tomography. Journal X-Ray Science and Technology, 15: 235–270. IOS Press.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Altersklassenflächen für Robinie und Edelkastanie gemäß Forsteinrichtung Baden-Württemberg, Stand 2012 6
Abbildung 2: Altersklassenflächen für Eiche gemäß Forsteinrichtung Baden-Württemberg, Stand 2012 6
Abbildung 3: Querschnitt einer Eiche 13
Abbildung 4: Transversalschnitt, Radialschnitt, Tangentialschnitt, Kastanie 14
Abbildung 5: CT-Scanner mit Baumstamm 16
Abbildung 6: Unterschiedlicher Frischegrad bei Robinie. 17
Abbildung 7: Vergleich von CT-slices von Acer saccharum (links) und Picea mariana (rechts) Stämmen 18
Abbildung 8: Einteilung der Probestämme 19
Abbildung 9: Präparierte Stammscheibe 20
Abbildung 10: Slice einer Kastanien-Stammscheibe 20
Abbildung 11: Versuchsaufbau einer Mikroskopmessung mit Digitalpositiometer und integrierten Videomodul. Präparierte Eichenstammscheibe mit Nagel oben rechts. 21
Abbildung 12: Mikroskopmessungen. Gemessen wird vom Ausgangspunkt m1 für Messung 1 und vom Ausgangspunkt m2 für Messung 2 22
Abbildung 13: Boxplots der Dichtevariation von Holz und Rinde bei der Kastanie. 23
Abbildung 14: Querschnitt und Querschnitt in Polarprojektion einer Kastanienstammscheibe. Der rote Kreis hebt einen Bereich mit Rinde, Splint- und Kernholz hervor. Der dunkle Streifen mittig im Kreis wurde als das Splintholz identifiziert. 24
Abbildung 15: Dichtevariation entlang Messstrecke einer Kastanienstammscheibe mit quadratischer Ausgleichskurve 25
Abbildung 16: Rindenablösung an einer Kastanie im Längs- (links) und Querschnitt (rechts) 27
Abbildung 17: Rindenverletzung an einer Kastanie im Längs- (links) und Querschnitt (recht) 28
Abbildung 18: Auswachsender Ast an einer Kastanie im Längs- (links) und Querschnitt (rechts). Die rote Linie ist jeweils der Schnittverlauf im anderen Bild. 29
Abbildung 19: Boxplots der besten Ergebnisse der Optimierung für die Rindenerkennung bei Kastanie 30
Abbildung 20: Boxplots der besten Ergebnisse der Optimierung für die Erkennung der Splintgrenz bei Kastanie 31
Abbildung 21: Variation der Dichte der einzelnen Kompartimente im Übergangsbereich von Holz zu Rinde bei der Eiche. 32
Abbildung 22: Grauwerte entlang der Messstrecke einer Eichenstammscheibe mit Ausgleichskurve Polynomfunktion 3. Ordnung) 33
Abbildung 23: Durchmesser des Kernholzes der Eichenstammscheiben über dem Gesamtdurchmesser der Eichenstammscheiben. 34
Abbildung 24: Variation der Differenz zur Referenzmessung der Ergebnisse der Optimierung für die Rindenerkennung von Eiche 35
Abbildung 25: Streuung der Differenz zur Referenzmessung der Ergebnisse der Optimierung für die Kernholzerkennung von Eiche 36
Abbildung 26: Kastengrafiken der Holzmerkmale der Robinie. Lücke bezeichnet den Spalt zwischen Bast und Splint bei sich ablösender Rinde. 37
Abbildung 27: Grauwerte entlang eines Messradius einer Stammscheibe von Robinie mit Ausgleichskurve Polynomfunktion 3. Ordnung) 38
Abbildung 28: Querschnitt eines Kastanienstammes 39
Abbildung 29: Variation der frischen Dichte [kg/m³] der Rinde für Kastanie im CT-Scan 40
Abbildung 30: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Splintholzes für Kastanie im CT-Scan 40
Abbildung 31: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Kernholzes für Kastanie im CT-Scan 40
Abbildung 32: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Rindenstärke für Kastanie 41
Abbildung 33: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Rindenanteil für Kastanie 41
Abbildung 34: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Splintholzanteil für Kastanie 43

Abbildung 35: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Kernholzanteil für die Kastanie 43
Abbildung 36: Querschnitt eines Eichenstammes 44
Abbildung 37: Variation der frischen Dichte [kg/m³] der Rinde für Eiche im CT-Scan 45
Abbildung 38: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Splintholz für Eiche im CT-Scan 45
Abbildung 39: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Kernholz für Eiche im CT-Scan 45
Abbildung 40: Variation der Rindenstärke über den Stammdurchmesser für Eiche 46
Abbildung 41: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Rindenanteil für Eiche 46
Abbildung 42: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Splintholzanteil für Eiche 48
Abbildung 43: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Kernholzanteil für Eiche 48
Abbildung 44: Querschnitt eines Robinienstammes 49
Abbildung 45: Querschnitte zweier Robinienstämme. 49
Abbildung 46: Variation der frischen Dichte [kg/m³] der Rinde für Eiche im CT-Scan 50
Abbildung 47: Variation der frischen Dichte [kg/m³] des Holz für Robinie im CT-Scan 50
Abbildung 48: Variation der Rindenstärke über den Stammdurchmesser für Robinie 51
Abbildung 49: Beziehung zwischen Stammdurchmesser und Rindenanteil für Robinie 51
Abbildung 50: Rindenstärke und Rindenanteil am Durchmesser 54
Abbildung 51: Variation der Holzfeuchte bei der Kastanie 55
Abbildung 52: Variation der Holzdichte (darr) bei der Kastanie 55
Abbildung 53: Variation der Holzdichte (CT) bei der Kastanie 55
Abbildung 54: Variation der Holzfeuchte je Einzelbaum bei der 56
Abbildung 55: Variation der Holzdichte je Einzelbaum bei der Kastanie 56
Abbildung 56: Variation der Holzdichte (CT) je Einzelbaum bei der Kastanie 57
Abbildung 57: Variation der Holzfeuchte mit Abstand zum Mark bei der Kastanie 57
Abbildung 58: Variation der Holzdichte (CT) mit Abstand zum Mark bei der Kastanie 58
Abbildung 59: Variation der Holzfeuchte bei der Eiche 59
Abbildung 60: Variation der Holzdichte (darr) bei der Eiche 59
Abbildung 61: Variation der Holzdichte (CT) bei der Eiche 59
Abbildung 62: Variation der Holzfeuchte je Einzelbaum bei der Eiche 60
Abbildung 63: Variation der Holzdichte (darr) je Einzelbaum bei der Eiche 60
Abbildung 64: Variation der Holzdichte (CT) je Einzelbaum bei der Eiche 61
Abbildung 65: Variation der Holzfeuchte mit Abstand zum Mark bei der Eiche 61
Abbildung 66: Variation der Holzdichte (CT) mit Abstand zum Mark bei der Eiche 62
Abbildung 67: Variation der Holzfeuchte bei der Robinie 63
Abbildung 68: Variation der Holzdichte (darr) bei der Robinie 63
Abbildung 69: Variation der Holzdichte (CT) bei der Robinie 63
Abbildung 70: Variation der Holzfeuchte je Einzelbaum bei der Robinie 64
Abbildung 71: Variation der Holzdichte (darr) je Einzelbaum bei der Robinie 64
Abbildung 72: Variation der Holzdichte (CT) je Einzelbaum bei der Robinie 65
Abbildung 73: Variation der Holzfeuchte mit Abstand zum Mark bei der Robinie 65
Abbildung 74: Variation der Holzdichte (CT) mit Abstand zum Mark bei der Robinie 66

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Kennwerte des bereitgestellten Untersuchungsmaterials 2
Tabelle 2: Flächen und Vorräte der Baumart Edelkastanie im öffentlichen und privaten Wald in Baden-Württemberg 5
Tabelle 3: Edelkastanie - Baumartenflächen der Altersklassen III (½ Fläche) und IV nach Landkreisen und Prognosejahren 8
Tabelle 4: Robinie - Baumartenflächen der Altersklassen III (½ Fläche) und IV nach Landkreisen und Prognosejahren 8
Tabelle 5: Eichen - Baumartenflächen der Altersklassen III (½ Fläche) und IV nach Landkreisen und Prognosejahren 9
Tabelle 6: Prognose der Kreisforstämter zu voraussichtlichen Nutzungsmengen nach Baumarten in 10, 20 und 30 Jahren 10
Tabelle 7: Reindichte Holz und Rindengewebe 14
Tabelle 8: Kennzahlen zur Rinde verschiedener Nadel- und Laubholzarten 15
Tabelle 9: Parameter für die Optimierung für die Rindenerkennung bei Kastanie 30
Tabelle 10: Parameter für die Optimierung für die Splintholz-Kernholzgrenze bei Kastanie 31
Tabelle 11: Parameter für die Optimierung für die Rindenerkennung von Eiche 35
Tabelle 12: Parameter für die Optimierung für die Splintholz-Kernholzgrenze von Eiche 36
Tabelle 13: Regressionsmodelle Rindenanteil am Gesamtvolumen für Kastanie 42
Tabelle 14: Regressionsmodelle Splintholzanteil für Kastanie 42
Tabelle 15: Regressionsmodelle zur Herleitung des Rindenanteils am Stammquerschnitt für Eiche 47
Tabelle 16: Modelle zur Herleitung des Rindenanteils am Stammquerschnitt für Robinie 52
Tabelle 17: Regressionsmodelle zur Herleitung des Rindenanteils am Stammvolumen für Robinie 53
Tabelle 18: Deskriptive Statistik – Holzfeuchte, Holzdichte darr und Holzdichte (CT) für die Kastanie 54
Tabelle 19: Deskriptive Statistik – Holzfeuchte, Holzdichte darr und Holzdichte (CT) für die Eiche 58
Tabelle 20: Deskriptive Statistik – Holzfeuchte, Holzdichte darr und Holzdichte (CT) für die Robinie 62

BERICHTE FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

Verzeichnis der bisher erschienenen Hefte

ISSN 1436 -1566

Heft		Euro
1 (1998)	SIMON, A.; REIF, A.: Der Mathislewald in Hinterzarten: Stiftungswald der Universität Freiburg. Waldbau-Institut, Univ. Freiburg. 91 S.* (vergriffen)	
2 (1998)	SUCHANT, R.; GLOCKMANN, A. (Red.): Auerhuhn und Haselhuhn in einer mitteleuropäischen Kulturlandschaft. Beiträge der internationalen Fachtagung in Oberprechtal, Baden-Württemberg, vom 9. bis 12. Oktober1997. FVA, Freiburg. 143 S.	6,50
3 (1998)	BRANDL, H.; HERCHER, W.; LÖBELL, E.; NAIN, W.: Betriebswirtschaftliche Untersuchungen im bäuerlichen Privatwald in Baden-Württemberg: Testbetriebsnetz Kleinprivatwald 5 - 200 ha. Ergebnisse FWJ 1997. FVA, Freiburg. 91 S.	3,00
4 (1999)	LABUDDA, V. (Bearb.): Die Bestandesstruktur des Bannwaldes "Grubenhau" im Forstbezirk Langenau bei Ulm (Baden-Württemberg). Ergebnisse der Forstlichen Grundaufnahmen 1986 und 1997. FVA, Freiburg. 55 S.	4,00
5 (1999)	LABUDDA, V. (Bearb.): Die Bestandesstruktur des Bannwaldes "Birkenkopf" im Nordschwarzwald. Ergebnisse der Forstlichen Grundaufnahme 1994. FVA, Freiburg. 31 S.	2,50
6 (1999)	HANKE, U.; PISOKE, TH.: Der Sturmwurfbannwald "Teufelsries": Waldstrukturerhebung mit Forstlicher Grundaufnahme und Luftbilddokumentation. FVA, Freiburg. 80 S.	4,00
7 (1999)	SCHÄFFER, J.; HOCH, R.; WILPERT, K. V. (Red.): Stoffhaushalt von Waldökosystemen. Gemeinsames Kolloquium des Arbeitskreises "Waldböden" der DGB und der Sektion Wald und Wasser im Deutschen Verband Forstlicher Versuchs- und Forschungsanstalten in Freiburg vom 19. bis 20. April 1999. FVA, Freiburg. 182 S.	6,00
8 (1999)	HANEWINKEL, M. (Hrsg.): Überführung von Altersklassenwäldern in Dauerwälder. Beiträge zu einer Fachtagung an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg am 3. und 4. Dezember 1998. Institut für Forstökonomie, Univ. Freiburg. 219 S.*	10,20
9 (1999)	HERRMANN, TH.; PRINZ, E.; SCHRÖTER, H.: Entwicklung des Kronenzustandes auf Fichten-Beobachtungsflächen in Baden-Württemberg. Ergebnisse und Analysen der 16jährigen Beobachtungen von 1983 bis 1998. FVA, Freiburg. 65 S.	5,00
10 (1999)	WILWERDING, A.; RÖSCH, CH.: Anbau, Bereitstellung und energetische Nutzung holzartiger Biomasse von Kurzumtriebsflächen aus ökologischer und ökonomischer Sicht. FVA, Freiburg. (unveröffentlicht)	
11 (1999)	HANKE, U.; AHRENS, W.: Bannwald "Großer Trauben" im Forstbezirk Pfullendorf (Baden-Württemberg) FVA, Freiburg. 33 S.	3,50
12 (1999)	WEBER, J.; WOTKE, S.A.; BÜCKING, W.: Bannwald "Sommerberg" im Forstbezirk Eppingen (Baden-Württemberg). FVA, Freiburg. 55 S.	4,00

* Bestellung über Waldbau-Institut, Universität Freiburg, e-mail: waldbau@uni-freiburg.de

13 (1999)	SEEMANN, D. (Bearb.): Die Massenvermehrung des Schwammspinners (Lymantria dispar L.) in Baden-Württemberg 1993-1994. FVA, Freiburg. 235 S.	6,50
14 (1999)	BRANDL, H.; HERCHER, W.; LÖBELL, E.; NAIN, W.; OLISCHLÄGER, G.; WICHT-LÜCKGE, G.: 20 Jahre Testbetriebsnetz Kleinprivatwald in Baden-Württemberg: Betriebswirtschaftliche Ergebnisse 1979-1998. FVA, Freiburg. 122 S.	4,00
15 (1999)	KEGLER, H.-H.: Der Bannwald „Hechtsgraben“ im Forstbezirk Kenzingen (Baden-Württemberg). Ergebnisse der Forstlichen Grundaufnahmen 1981 und 1994. FVA, Freiburg. 39 S.	3,50
16 (1999)	Die Bedeutung der forstlichen Vegetationskunde für den naturnahen Waldbau – Ansprüche, Möglichkeiten und Grenzen. Standortskundlich-Waldbauliches Kolloquium der FVA am 13. April 1999. FVA, Freiburg. 89 S.	6,00
17 (2000)	EISFELD, D.; HUSS, J.; OESTEN, G.; UERPMANN, B.; VOLZ, K.-R. (Hrsg.): Wald und Schalenwild. Beiträge zu einer Fachtagung an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg am 2. und 3. Dezember 1999. Institut für Forstökonomie, Univ. Freiburg. 177 S.*	13,30
18 (2000)	ULLRICH, TH.: Der Bannwald „Eiberg“ im Forstbezirk Bad Wildbad (Baden-Württemberg). Ergebnisse der Forstlichen Grundaufnahme 1998. FVA, Freiburg. 48 S.	6,00
19 (2000)	RAU, H.; BRANDL, H.: Zwei Jahrhunderte Forstgeschichte Baden-Württemberg. Von der Königlich-Württembergischen Forstdirektion zur Forstdirektion Stuttgart. FVA, Freiburg. 191 S.	12,00
20 (2000)	WEBER, J.: Geostatistische Analyse der Struktur von Waldbeständen am Beispiel ausgewählter Bannwälder in Baden-Württemberg. FVA, Freiburg. 133 S.	12,00
21 (2000)	BRANDL, H.; BÜRGI, M.; JOHANN, E.; SCHUMACHER, W.; SCHMIDT, U.E.; VOLK, H.; VOLZ, K.-R.: Beiträge zur Forstgeschichte. FVA, Freiburg. 87 S.	9,00
22 (2000)	PISOKE, TH.: Die Waldstruktur im Bannwald Taubergießen. Eine Luftbildauswertung im strukturreichen Auewald. FVA, Freiburg. 96 S.	13,00
23 (2000)	GAERTIG, T.; SCHACK-KIRCHNER, H.; VOLKMANN, J.; WILPERT, K. V.: Physikalische und chemische Bodeneigenschaften als prädisponierende Faktoren neuartiger Eichenschäden. FVA, Freiburg u. Inst. für Bodenkunde, Univ. Freiburg. 95 S.	9,00
24 (2000)	AHRENS, W. ; GERBOTH, G. ; LABUDDA, V. ; LUDEMANN, T. ; SCHOTTMÜLLER, E.: Bannwald "Feldseewald " im Schwarzwald im Forstbezirk Kirchzarten (vorher Schluchsee). FVA, Freiburg. 130 S.	13,00
25 (2001)	HUSS, J.; HEHN, M. (Hrsg.): Wiederbewaldung von Sturmschadensflächen. Beiträge zu einem gemeinsamen Kolloquium von Forstwissenschaftlicher Fakultät der Universität Freiburg und Forstlicher Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg am 21. und 22. September 2000 in Freiburg. Waldbau-Institut, Univ. Freiburg. 148, XIII S.*	11,80
26 (2001)	SCHRÖTER, H.; BECKER, T.: Die Ausbreitung des Borkenkäferbefalls im Bereich von Sturmwurf-Sukzessionsflächen. Eine Untersuchung in Sturmwurf-bannwäldern Baden-Württembergs. FVA, Freiburg. 79 S.	15,00
27 (2001)	BARON, U.; BRANDL, H.; HERCHER, W.; NAIN, W.: Testbetriebsnetz der Forstwirtschaft in Baden-Württemberg. Betriebswirtschaftliche Ergebnisse der Waldbesitzarten im FWJ 1999. FVA, Freiburg. 67 S.	7,00

* Bestellung über Waldbau-Institut, Universität Freiburg, e-mail: waldbau@uni-freiburg.de

28 (2001)	SEILER, W.: Erläuterungen zum Bannwald "Pfannenberg". Forstbezirk Kirchheim (Teck). FVA, Freiburg. 46 S.	7,00
29 (2001)	BÜCKING, W.; GEISCHER, B.; WINTERHOFF, W.; WOLF, T.: Die Bannwälder "Franzosenbusch" und "Kartoffelacker" in der Schwetzinger Hardt. Baden-Württemberg, Forstbezirk Schwetzingen. FVA, Freiburg. 147 S.	13,00
30 (2001)	WOHLFAHRT, D.; RIEDEL, P.: Bannwald "Wilder See - Hornisgrinde". Forstbezirk Schönmünzach. FVA, Freiburg. 68 S.	10,00
31 (2001)	KELLER, F.; RIEDEL, P.: Bannwald "Zweribach". Forstbezirk St. Märgen. Erläuterungen zur Forstlichen Grundaufnahme 1999. FVA, Freiburg. 64 S.	10,00
32 (2001)	10 Jahre Waldentwicklung nach Sturm "Wiebke". Untersuchungen in Fichten-Sturmwurfbannwäldern Baden-Württembergs. FVA, Freiburg. 205 S.	18,00
33 (2001)	Chemische und physikalische Schlüsselprozesse der Speicher-, Regler- und Reaktorfunktionen von Waldböden. Gemeinsamer Workshop des Arbeitskreises "Waldböden" der DBG u. der Sektion "Wald und Wasser" im DVFF in Freiburg vom 5. bis 6. April 2001. FVA, Freiburg. 208 S.	9,00
34 (2001)	BARON, U.; HERCHER, W.; NAIN, W.; PISTORIUS, T.: Testbetriebsnetze der Forstwirtschaft in Baden-Württemberg. Betriebswirtschaftliche Ergebnisse der Waldbesitzarten im FWJ 2000 (Sturmjahr "Lothar"). FVA, Freiburg. 100 S.	8,00
35 (2001)	BOLKENIUS, D.: Zur Wurzelausbildung von Fichte (*Picea abies* L. [Karst]) und Weißtanne (*Abies alba* Mill.) in gleich- und ungleichaltrigen Beständen. FVA, Freiburg. 155 S.	16,00
36 (2002)	ABEL, U.; RIEDEL, P.: Bannwald "Scheibenfelsen". Forstbezirk Kirchzarten. FVA, Freiburg. 47 S.	7,00
37 (2002)	KOCH, B. (ed.): Spatial technologies for forest inventories. Contributions to the XXI IUFRO World Congress. Institut für Fernerkundung u. Landschafts-informationssysteme, Univ. Freiburg. 238 S.*	10,00
38 (2002)	LOCH, R.: Statistisch-ökologischer Vergleich der epigäischen Spinnentierfauna von Bann- und Wirtschaftswäldern. Beitrag zur Erforschung der Biodiversität heimischer Wälder. FVA, Freiburg. 311 S.	23,00
39 (2002)	Orkan Lothar: Katastrophe für die naturgemäße Waldwirtschaft ? Oder: Über den Umgang mit Störungen im Nordschwarzwald. Tagungsband der ANW-Bundestagung vom 12.-14. Juni in Baden-Württemberg. FVA, Freiburg. 60 S.	5,50
40 (2002)	AHRENS, W.; GERTZMANN, CH.; RIEDEL, P.: Bannwald "Hoher Ochsenkopf". Forstbezirk Forbach. Erläuterungen zu den Forstlichen Grundaufnahmen 1985 und 1995. FVA, Freiburg. 75 S.	11,00
41 (2002)	NOWACK, A.: Bannwald "Bruchsaler Bruch". Forstbezirk Bruchsal. Erläuterungen zur Forstlichen Grundaufnahme 2000. FVA, Freiburg. 50 S.	11,00
42 (2002)	BANTLE, P. (Bearb.): Bannwald "Kleiner Imberg". Forstbezirk Eberbach. Erläuterungen zur Forstlichen Grundaufnahme 1999. FVA, Freiburg. 36 S.	11,00
43 (2002)	Holzasche-Ausbringung im Wald, ein Kreislaufkonzept. FVA-Kolloquium in Freiburg vom 5. bis 6. März 2002. FVA, Freiburg. 166 S.	12,00
44 (2003)	Großkronige Buchen – ein Konzept zur Wertholzerzeugung? Kolloquium 19. März 2002, Freiburg im Breisgau. FVA, Freiburg. 80 S. (vergriffen)	
45 (2003)	Vom Wert des Waldes jenseits von Aufwand und Ertrag. Kolloquium 17. September 2002, Freiburg im Breisgau. FVA, Freiburg. 87 S.	6,00

* Bestellung über Waldbau-Institut, Universität Freiburg, e-mail: waldbau@uni-freiburg.de

46 (2003)	GÜRTH, P. (Bearb.): Geschichte des Waldbaus in Baden-Württemberg im 19. und 20. Jahrhundert. Ein Projekt der LFV Baden-Württemberg. FVA, Freiburg. 224 S.	20,00
47 (2003)	HANSEN, J.; SPIECKER, H.; TEUFFEL, K. v. (eds.): The question of conversion of coniferous forests. Abstracts. Internat. Conference 27 September – 02 October, 2003, Freiburg im Breisgau, Germany. FVA, Freiburg. 73 S.	5,00
48 (2003)	MÜLLER, U.; STREIN, M.; SUCHANT, R.: Wildtierkorridore in Baden-Württemberg. FVA, Freiburg. 45 S. (vergriffen)	
49 (2003)	Boden und Wasservorsorge. Gemeinsames Kolloquium des Arbeitskreises "Waldböden" der DBG u. der Sektion "Wald und Wasser" im DVFFA in Freiburg vom 13. bis 15. Mai 2003. FVA, Freiburg. 229 S.	15,00
50 (2003)	HANEWINKEL , M.; TEUFFEL, K. V. (Hrsg.): Waldwachstumsmodelle für Prognosen in der Forsteinrichtung. Stand der Wissenschaft in Mitteleuropa. FVA, Freiburg. 102 S.	17,00
51 (2004)	International Symposium on Contributions of Family-Farm Enterprises to Sustainable Rural Development, 28 July – 01 August 2002, Gengenbach, Germany. Proceedings. FVA, Freiburg. 388 S.	25,00
52 (2004)	HAUFFE, PH. : „Weiterentwicklung der automatisierten Rundholzvermessung hinsichtlich der Erfassung und Quantifizierung äußerer und innerer Holzeigenschaften“. KAISER, R.: „Weiterentwicklung des Anforderungskataloges für die Werksvermessung von Stammholz. FVA, Freiburg. 80 S.	17,00
53 (2004)	KÖHL, M.; DEES, M.: Statistische Analyse von Kronenzustandsdaten aus der Interpretation von CIR-Luftbildern. Abt. Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme. Univ. Freiburg. 29 S.*	10,00
54 (2004)	HUSSENDÖRFER, E.; ALDINGER, E. (Hrsg.): Herkunftssicherung und Zertifizierung von forstlichem Vermehrungsgut. FORUM Genetik-Wald-Forstwirtschaft. Arbeitstagung vom 11. – 13. Juni 2001 an der FVA Freiburg. FVA, Freiburg. 159 S.	14,00
55 (2004)	BARON, U.; FILLBRANDT, TH.; HARTEBRODT, C.; HERCHER, W.: Testbetriebsnetze der Forstwirtschaft in Baden-Württemberg. Betriebswirtschaftliche Ergebnisse der Waldbesitzarten im FWJ 2001 und 2002. FVA, Freiburg. 105 S.	7,50
56 (2004)	Umweltüberwachung und Waldwachstum. Ehrenkolloquium zum 75. Geburtstag von Prof. Dr. Hans-Ulrich Moosmayer am 23. September 2003. FVA, Freiburg. 97 S.	14,00
57 (2004)	Impacts of the Drought and Heat in 2003 on Forests. Scientific Conference 17 – 19 November 2004 Freiburg, Germany. Abstracts. FVA, Freiburg. 70 S.	5,00
58 (2005)	Waldnaturschutz. Forschung, Planung, praktische Umsetzung. Kolloquium der Abt. Landespflege der FVA zur Standortsbestimmung im Bereich Wald und Naturschutz am 15. Juni 2004 in Freiburg. FVA, Freiburg. 127 S.	18,00
59 (2005)	HUG, R.; HEPP, R.; WILPERT, K. V. : 18 Jahre Depositionsmessnetz der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. FVA, Freiburg. 95 S.	14,00
60 (2005)	BAUHUS, J.; CSAPEK, G.: Beiträge zur Tagung 2004 der Sektion Waldbau DVFFA, 6 – 8 September in Freiburg/Staufen. Waldbau-Institut, Univ. Freiburg. 147 S.*	14,00

* Bestellung über Waldbau-Institut, Universität Freiburg, e-mail: waldbau@uni-freiburg.de

61 (2005)	Differenzialdiagnostische Untersuchungen zu Eichenschäden in Baden-Württemberg. Ansprache, Faktoren, Schlussfolgerungen. FVA, Freiburg. 193, 66 S.	14,00
62 (2005)	Wasservorsorge in bewaldeten Einzugsgebieten. Gemeinsames Kolloquium des Arbeitskreises "Waldböden" der DBG u. der Sektion "Wald und Wasser" im DVFFA in Freiburg vom 02. bis 03. Juni 2005. FVA, Freiburg. 240 S.	15,00
63 (2005)	VEIT, H.; BECKER, T.: Untersuchungen zu den Befallsbedingungen, zum Befallsablauf und zur Abwehr des Befalls von Laub- und Nadelholz durch den sägehörnigen Werftkäfer (Hylecoetus dermestoides Latr. (Coleoptera, Lymexylidae)). FVA, Freiburg. 111 S.	14,00
64 (2005)	Menschen für Raufußhühner. Beiträge des Statuskolloquium der Arbeitsgruppe Raufußhühner in Freiburg, Baden-Württemberg am 10. Mai 2005. FVA, Freiburg. 249 S.	20,00
65 (2006)	HOHENLOHE-WALDENBURG, F.K. zu: Zur Waldgeschichte des Hohenloher Landes. FVA, Freiburg. 109 S., 9 Kt. (vergriffen)	
66 (2006)	HERBSTRITT, S.; KOHNLE, U.; ABETZ, P.; KENK, G. (eds.):The European stem number experiment in Norway spruce (Picea abies (L.)Karst.); 3. report. IUFRO working party 1.05.05 "Thinning Experiments". FVA, Freiburg. 132 S.	12,00
67 (2006)	ORF, S.: Neue Entwicklungen im Forstrecht. Gesetzgebung, Verwaltung und insbes. Rechtsprechung. FVA, Freiburg. 49 S.	6,00
68 (2006)	BAUHUS, J.; SCHERMBECK, J. (eds.): Ecosystem goods and services from planted forests. Abstracts of the scientific forum of the International Congress on Cultivated Forests, 3rd - 7th October 2006, Bilbao, Spain. Waldbau-Institut, Univ. Freiburg. 236 S. + 1 CD ROM*	12,50
69 (2006)	IVITS, E.; HEMPHILL, S.; LANGAR, F.; KOCH, B: Optimisation of Land Cover and Forest Habitats Classification for the Monitoring of Habitat Directive Areas in Thuringia, Germany: Advantages and Disadvantages of Pixel- and Object-Based Classification Methods Based on the Spot 5 Sensor. Univ. Freiburg. 92 S.*	17,80
70 (2007)	Europäische Flußauen und Auewälder. Ergebnisse des Kolloquiums vom 26. bis 28.04.2006. FVA, Freiburg. 205 S.	25,00
71 (2006)	HARTEBRODT, C.; FILLBRANDT, T.; HERCHER, W.; HAAGER, H.; BITZ, S.; HOLTHAUSEN, N.: Wald - Besitz - Ökonomie - 2006. FVA, Freiburg. 113 S.	15,00
72 (2006)	BUB, G.; DELB, H.; SCHRÖTER, H.: Die Gradation des Schwammspinners (Lymantria Dispar L.) 2004/2005 in Baden-Württemberg. FVA, Freiburg. 64 S.	14,00
73 (2007)	PISTORIUS, T.; ZELL, J.; HARTEBRODT, C.: Untersuchungen zur Rolle des Waldes und der Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt des Landes Baden-Württemberg. FVA, Freiburg. 182 S.	17,00
74 (2007)	Wald – Besitz – Ökonomie – 2007. FVA, Freiburg. 152 S.	16,00
75 (2007)	WILPERT, K. V.; NIEDERBERGER, J.; PUHLMANN, H.: Fallstudien zur Bewertung und Entwicklung forstbetrieblicher Optionen zur Sicherung der Wassergüte in bewaldeten Einzugsgebieten. Wirkung von Bodenschutzkalkungen auf die Wasserqualität. FVA, Freiburg. 65 S.	12,00
76 (2008)	SPIECKER, H.; TEUFFEL, K. v. (Hrsg.): Forstwissenschaftliche Tagung 2008: Ressourcenknappheit und Klimaänderung, 24.-27. September 2008. Univ. Freiburg u. FVA Freiburg. 134 S.	12,50

* Bestellung über Waldbau-Institut, Universität Freiburg, e-mail: waldbau@uni-freiburg.de

77 (2008)	PONTUALI, S.; BURZLAFF, T.; SCHRÖTER, H.: Der Buchdrucker (Ips typographus [L.]) im "Bannwald Napf". Rekonstruktion der Populationsdynamik in den Jahren 1990 bis 2006. FVA, Freiburg u. Univ. Freiburg. 52 S.	14,00
78 (2008)	Starkholz - Premiumprodukt oder Problemsortiment? Chance und Herausforderung für Produktion, Bereitstellung und Vermarktung. Fachtagung im Juli 2008. FVA, Freiburg. 120 S.	12,00
79 (2009)	Walderschließung und Bodenschutz. Abschlusskolloquium in Freiburg vom 6. bis 7. März 2008. FVA, Freiburg. 134 S.	12,00
80 (2009)	BERNAUER, B.: Hiebsreifeanalyse von Waldbeständen. FVA, Freiburg. 122 S.	13,00
81 (2009)	ALBRECHT, A; KOHNLE, U.; BÄUERLE, H. et al.: Perspektiven einer nachhaltig wertleistungsoptimierten Waldwirtschaft im waldreichen ländlichen Raum Ostalb. FVA, Freiburg. 144 S.	14,00
82 (2009)	Bedeutung des Klimawandels für Bodenprozesse : gemeinsames Kolloquium des Arbeitskreises "Waldböden" der DBG und der Sektion "Wald und Wasser" im DVFFA in Freiburg vom 24. bis 25. April 2008. FVA, Freiburg. 226 S.	15,00
83 (2009)	Aktivierung von Wertschöpfungspotentialen zur nachhaltigen Nutzung und Verwendung von Nadel- und Laubstarkholz. Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt Starkholz. FVA, Freiburg. 244 S.	15,00
84 (2010)	HARTEBRODT, C. (Red.): Proceedings. International Workshop on Figures for Forests ; 24. - 26.11.2008, Freiburg, Germany. FVA, Freiburg. 172 S.	18,00
85 (2010)	SPIECKER, H.; KOHNLE, U.; MAKKONEN-SPIECKER, K.; TEUFFEL, K. V. (eds.): Opportunities and risks for Douglas fir in a changing climate. Abstracts. Oct. 18 – 20, 2010. Univ. Freiburg u. FVA Freiburg. 65 S.	14,00
86 (2011)	MAKKONEN-SPIECKER, K. ; SELTER, A. ; BRILL, CH.: FVA-Dienstleistungen auf dem Prüfstand. Onlinebefragung 2009. FVA, Freiburg. 46 S.	7,00
87 (2011)	WILPERT, K. V. et al.: Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. FVA, Freiburg. 155 S.	16,00
88 (2011)	Bodenzustandserfassung, aktuelle Gefährdungen und Trends : Gemeinsames Kolloquium des AK „Waldböden“ der DBG und der Sektion „Wald und Wasser“ im DVFFA und des vTI Eberswalde in Freiburg am 18. – 19. Mai 2010. FVA, Freiburg. 180 S.	18,00
89 (2011)	DELB, H.; PONTUALI, S. (eds.): Biotic risks and climate change in forests. 10th IUFRO workshop of WP 7.03.10 "Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe". Proceedings. FVA, Freiburg. 198 S.	19,00
90 (2011)	HARTEBRODT, C. (Red.): 2011 IUFRO Small-Scale Forestry Conference: synergies and conflicts in social, ecological and economic interactions. Proceedings. FVA, Freiburg. 302 S.	22,00
91 (2012)	UNSELD, R ; BAUHUS, J.: Energie-Vorwälder - Alternative Bewirtschaftungsformen zur Steigerung der energetisch nutzbaren Biomasse im Wald durch Integration von schnell wachsenden Baumarten. Waldbau-Institut, Univ. Freiburg. 215 S.[3]	21,85

[3] Bestellung über Waldbau-Institut, Universität Freiburg, e-mail: waldbau@uni-freiburg.de

92 (2012)	Erklärungsmuster im Flickenteppich. Ein kaleidoskopischer Einblick in die Privatwaldforschung im Jahr 2012. Festschrift zum 75. Geburtstag von Prof. Helmut Brandl. FVA, Freiburg. 144 S.	16,00
93 (2012)	MAKKONEN-SPIECKER, K.; BONADIO, S. (eds.): Governance of forest research and education - innovations in participatory management. IUFRO Research Group 9.02.00 - "Management of Forest Research" Directors' Forum; Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 7-8 May 2012. Proceedings. FVA, Freiburg. 92 S.	12,00
94 (2012)	WILPERT, K. V. (Red.): Energieholz und Nachhaltigkeit. FVA-Fachtagung in Freiburg am 13. Dezember 2011. FVA, Freiburg. 126 S.	12,00
95 (2013)	HOCK, C.; HARTEBRODT, C.; SCHÖTTNER, M.: Aufwandsoptimierte und multiplikatororientierte Beratung. FVA, Freiburg.	
96 (2013)	WILPERT, K. V. (Red.): Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Stoff- und Wasserkreislauf. FVA-Kolloquium in Freiburg am 4. - 5. Oktober 2012. FVA, Freiburg. 211 S.	20,00
97 (2014)	SCHMACK, S.; AICHHOLZ, R.; HARTEBRODT, C.: Naturschutzfachliche Einschränkungen der Forstwirtschaft. FVA, Freiburg. (im Druck)	