

H. Wernsdörfer · P. Reck · U. Seeling · G. Becker ·
T. Seifert

Erkennung und Messung des Reaktionsholzes bei Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) mittels Verfahren der digitalen Bildanalyse

Online veröffentlicht: 14 Mai 2004
© Springer-Verlag 2004

Zusammenfassung Sowohl für wissenschaftliche Untersuchungen als auch für praktische Anwendungen sind methodische Entwicklungen zur Erfassung und Messung des Reaktionsholzes der Fichte wünschenswert. Mit der vorliegenden Untersuchung wurde das Ziel verfolgt, ein innovatives Verfahren zur Erfassung und Messung von Reaktionsholz zu entwickeln und zu testen. Das vorgestellte Verfahren der digitalen Bildanalyse erlaubt es, anhand digitaler Fotografien von Stammscheiben der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) Reaktionsholzbereiche zu erkennen, jahringweise zu erfassen sowie deren Flächeninhalt, die Lage als Abweichungswinkel von der Nordrichtung und den Abstand von der Markröhre zu berechnen. Des Weiteren kann der Flächeninhalt der gesamten Stammscheiben anhand der Bilder ermittelt werden, so dass die Reaktionsholzflächen auch in Flächenanteile umgerechnet werden können. Die Größe der beim Fotografieren auftretenden Abbildungsfehler, die sogenannte Verzeichnung, wurde im Rahmen der vorgestellten Untersuchung geprüft, die als Prozentwert angegebene Abweichung liegt jedoch unter 1% und kann daher vernachlässigt werden. Mit dem Verfahren ist es möglich, rasch, objektiv und detailliert das Reaktionsholz bei Fichte zu erfassen, so dass die Kenntnisse über die Reaktionsholzverteilung in Stämmen, aber auch in Schnittholz vertieft werden können.

Identifying and measuring compression wood of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) by using methods of digital image analysis

Abstract Both for scientific analyses and for practical applications methodical developments are desirable for identifying and measuring compression wood of Norway Spruce. The objective suggested in the present study was to develop and to test an innovative method for identifying and measuring compression wood. Methods of digital image analysis using digital photographs of discs of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) permit, to detect and to identify independently compression wood areas within single annual rings, and to calculate their area, the position given as an angle of the deviation to the direction of North and the distance from the pith. Furthermore the total area of the discs can be determined, so that the compression wood areas can be converted to proportions of the total disc area. The quantity of the images' inaccuracy, the so-called lens distortion, was tested within the frame of the study presented, however the inaccuracy given as a percentage amounts to less than 1% and can therefore be neglected. Using this method it is possible to identify quickly, objectively and detailed compression wood of Norway Spruce, so that the knowledge about the distribution of compression wood in stems and in sawn timber as well can be extended.

1 Einleitung und Zielsetzung

Vertreter der Sägeindustrie sehen im Reaktionsholz der Fichte, das als sogenanntes Druckholz ausgebildet wird, eines der wichtigsten, die Holzverwendung begrenzenden Holzmerkmale, so dass das Reaktionsholz in seiner Bedeutung unmittelbar hinter der Astigkeit des Holzes einzureihen ist (Bues 1990). In jüngster Zeit hat sich gezeigt, dass die Verfahren zur zerstörungsfreien Festigkeitssortierung von Nadelschnittholz bei hohem Vorkommen von Reaktionsholz an Zuverlässigkeit verlieren (Seeling 1999). Daher ist es für die Analyse der Ursachen der Reaktions-

H. Wernsdörfer (✉) · P. Reck · U. Seeling · G. Becker
Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft,
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Werderring 6, 79085 Freiburg i. Br., Deutschland
E-Mail: holger.wernsdoerfer@fobawi.uni-freiburg.de

T. Seifert
Lehrstuhl für Waldwachstumskunde,
Technische Universität München,
Am Hochanger 13, 85354 Freising, Deutschland

holzbildung, ebenso wie für die Verwendung des Holzes entscheidend, die Kenntnisse über Ausprägung und Verteilung des Reaktionsholzes zu erweitern. Dafür fehlen jedoch bislang Methoden für eine rasche und zweckmäßige Erfassung des Reaktionsholzes. Die bislang am häufigsten angewandten Verfahren sind sehr aufwendig (z. B. Durchleuchten von Dünnschnitten aus Holz nach Pillow 1941, vgl. Absatz 2) bzw. eine effektive, jahringweise Erfassung erscheint nicht ohne weiteres möglich (z. B. Planimetrie-Verfahren, vgl. Absatz 2). Daher wird bei der Rund- und Schnittholzsortierung nach europäischen Normen das Reaktionsholz bzw. der Reaktionsholzanteil durch Messung der Ausdehnung von Reaktionsholzbereichen näherungsweise bestimmt¹.

Aus dieser Problematik leitet sich die Zielsetzung ab, ein innovatives Verfahren zur Erfassung und Quantifizierung von Reaktionsholz zu entwickeln und im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung zu testen. Hierbei sollen digitale Fotografien von Stammscheiben computergestützt ausgewertet werden.

2 Stand des Wissens

Reaktionsholz von Nadelhölzern kann unter dem Lichtmikroskop eindeutig identifiziert werden: Tracheiden, die Reaktionsholz enthalten, weisen einen annähernd runden Querschnitt auf, das heißt im Vergleich zum Normalholz sind die Zellwände verdickt und die Lumina enger, so dass zahlreiche, relativ große Interzellularen entstehen (Knigge und Schulz 1966). Außerdem sind Tracheiden, die Reaktionsholz enthalten, kürzer in ihrer longitudinalen Ausdehnung.

Der hohe Anteil an Lignin führt dazu, dass Reaktionsholzbereiche bei Fichte durch ihre gelblich orange Farbe visuell zu erkennen sind.

Auf dieser visuellen Diskriminierung basieren mehrere in der Literatur beschriebene Verfahren zur Erkennung und Erfassung des Reaktionsholzes bei Fichte. Am häufigsten ist in den letzten Jahren das sogenannte Planimetrie-Verfahren zur Anwendung gekommen. Dabei werden die auf einem angefeuchteten Holzquerschnitt sichtbaren Reaktionsholzbereiche auf eine spezielle Glasplatte oder auf transparentes (Millimeter-)Papier übertragen und die Flächeninhalte von Reaktions- und Normalholz mit einem Planimeter gemessen. Werden die Reaktionsholzbereiche auf ein Papier übertragen, bei dem das Gewicht je Flächeneinheit konstant und bekannt ist, so können die entsprechenden Flächen auch ausgeschnitten und durch Wiegen des Papiers bestimmt werden. Dieses Verfahren wurde unter anderem von Abetz und Künstle (1982), Bues (1990) und auch von Merforth (2000) angewendet.

Pillow (1941) durchleuchtete Dünnschnitte aus Holz und fand, dass sich das Reaktionsholz aufgrund seiner

Lichtundurchlässigkeit vom Normalholz diskriminieren lässt. In der Literatur werden weiterhin verschiedene Färbetechniken beschrieben, mit denen das Reaktionsholz visuell noch deutlicher sichtbar gemacht werden kann (z. B. Knigge 1958, Timell 1986). Sie beruhen in der Regel auf einer Anfärbung des Lignins zum Beispiel mit einer Mischung aus Malachitgrün und Methylenblau in Alkohol.

Ungefähre Werte für den Reaktionsholzanteil können auch anhand von Dichtemessungen mit hoher Auflösung ermittelt werden, wie sie bei der Bestimmung des Spätholzanteils innerhalb des Normalholzes angewendet werden (Timell 1986). Abetz und Künstle (1982) bestimmten anhand von Stammscheiben den Reaktionsholzflächenanteil an der Gesamtfläche eines Jahrrings durch ein Schätzverfahren, bei dem der jeweilige Reaktionsholzbereich innerhalb eines Jahrrings durch zwei Radien abgegrenzt und der relative Flächenanteil des Reaktionsholzes in Prozent innerhalb des abgegrenzten Jahringbereichs geschätzt wird. Der Reaktionsholzflächenanteil an der Gesamtfläche eines Jahrrings berechnet sich nach folgender Formel:

$$RF = \frac{RW}{360^\circ} \times RP$$

RF = Reaktionsholzflächenanteil an der Gesamtfläche eines Jahrrings

RW = Winkel zwischen den beiden Radien, die den Reaktionsholzbereich abgrenzen

RP = Schätzwert des Reaktionsholzflächenprozentes im abgegrenzten Jahringbereich

Andersson und Walter (1995) beschreiben eine auf digitaler Bildanalyse basierende Methode zur Messung und Klassifizierung von Reaktionsholz bei Nadelhölzern. Sie unterscheiden zwischen *normal wood* und den beiden Intensitätsstufen *mild* und *severe compression wood*. Indem dünne Stammscheiben von ihrer Unterseite her durchleuchtet werden, können die drei Holztypen *normal wood*, *mild* und *severe compression wood* optisch anhand von Farbunterschieden voneinander abgegrenzt werden. Mit einer digitalen Kamera wird von jeder Stammscheibe ein Bild erstellt. Die Reaktionsholztypen *mild* und *severe compression wood* werden im Bild anhand ihrer Färbung algorithmisch durch eine entsprechende Software erfasst und ihr Flächeninhalt, die Lage relativ zur Markröhre sowie der Flächeninhalt der Stammscheibe berechnet. Da die Farbwerte jedes Holztypus zwischen den Stammscheiben variieren, zum Beispiel aufgrund unterschiedlicher Dicke der durchleuchteten Stammscheiben, müssen von dem Bedienpersonal bei jedem Bild die Farbwerte der Holztypen *normal wood*, *mild* und *severe compression wood* anhand von etwa zwölf Pixeln neu definiert werden.

Mit dem Ziel, die Gütesortierung von Schnittholz zu automatisieren, führte Hagman (1997) Untersuchungen zur Vorhersage von Holzigenschaften mittels eines Bildspektrografen durch. Am Beispiel des Reaktionsholzes wird die Entwicklung eines linearen Algorithmus be-

¹ ENV 1927-1 (1998): Messung der radialen Ausdehnung von Reaktionsholzbereichen; EN 1611-1 (1999) – Messung nach EN 1310 (1997): Länge und/oder Breite des einen Reaktionsholzbereich umschließenden Rechtecks

schrieben, der eine zu 92-94% zutreffende Klassifizierung der Reaktionsholzanteile in Nadelholz (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*) ermöglicht.

Nyström (1999) fasst die Ergebnisse von vier Untersuchungen² zusammen, die sich mit Verfahren der Bildanalyse zur zerstörungsfreien Erkennung von Reaktionsholz im Hinblick auf eine industrielle Klassifizierung/Sortierung von Schnittholz beschäftigen. Die Aufnahmen erfolgten an frischem und/oder getrocknetem Schnittholz der Fichte (*Picea abies*) oder Southern Yellow Pine (SYP)³. Folgende Verfahren wurden getestet:

Spektralbildanalyse: Die Spektralbildanalyse arbeitet mit vielen engen Wellenlängenbändern. Auf diese Weise können wesentlich geringfügigere Farbunterschiede erkannt werden als mit einer praxisüblichen Farbkamera. Unter Anwendung dieses Verfahrens entwickelten Nyström und Hagman (1999a) lineare Modelle zur automatischen Klassifizierung von Reaktionsholz, die bei einem Test an 11 von 14 getrockneten Brettern (*Picea abies*) eine zutreffende Klassifizierung gewährleisteten.

Farbbildanalyse: Nyström und Kline (1999) entwickelten ein nicht-lineares Modell zur automatischen Klassifizierung von Reaktionsholz in grünem Schnittholz (SYP) anhand von Farbbildern. Die Aufnahmen erfolgten mit einer RGB⁴-Licht empfindlichen Zeilenkamera, unter der das Schnittholz hindurchgeführt wurde. Ein Vergleich der automatischen Klassifizierung mit einer visuellen/manuellen Ansprache ergab, dass durchschnittlich 89% der Reaktionsholzflächen zutreffend klassifiziert wurden.

Röntgenbildanalyse: Der Absorptionsgrad von Röntgenstrahlen im Holz ist stark dichteabhängig (Lindgren 1991). Das Verfahren ermöglicht stärker ausgeprägtes Reaktionsholz, das im Vergleich zum Normalholz deutlich dichter ist, in trockenem Schnittholz zu erkennen (Nyström 1998 an *Picea abies*, Nyström und Hagman 1999b an SYP).

Tracheiden-Effekt: Beim Durchleuchten von Dünnschnitten aus Holz mit einem Laserstrahl wird das Licht an den Holzfasern gestreut. Im Vergleich zu Normalholz ist bei Reaktionsholz die Lichtstreuung in Faserrichtung geringer. An grünem Schnittholz (*Picea abies*) kann dieser Effekt zur Erkennung von Reaktionsholz genutzt werden (Nyström und Hagman 1999b). Allerdings unterscheiden sich die Ergebnisse bei Splint- und Kernholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte. An getrocknetem Schnittholz (*Picea abies*) zeigt das Verfahren sehr vielversprechende Ergebnisse (Nyström 1998, Nyström und Hagman 1999b).

² Nyström (1998), Nyström und Hagman (1999a), Nyström und Hagman (1999b), Nyström und Kline (1999)

³ wirtschaftliche Bezeichnung, umfasst im Wesentlichen *Pinus taeda*, *Pinus palustris*, *Pinus echinata* und *Pinus eliottii*

⁴ RGB: Rot, Grün, Blau

3 Untersuchungsvariablen und -material

3.1 Variablen zur Charakterisierung des Reaktionsholzes

Der Grundgedanke des im Folgenden beschriebenen Verfahrens besteht darin, die Erfassung und Messung des Reaktionsholzes computergestützt an Hand digitaler Fotografien von Stammscheiben durchzuführen. Auf diese Weise sollen die Messungen im Vergleich zum früheren, rein visuellen Vorgehen objektiviert und gleichzeitig schneller und präziser durchgeführt werden. Das computergestützte Verfahren bietet die Möglichkeit, das Reaktionsholz standardisiert zu erfassen: Das Reaktionsholz wird vom Normalholz anhand der unterschiedlichen Farbe einheitlich abgegrenzt, da der Toleranzwert der Software für die Erkennung der Farbunterschiede konstant gehalten wird. Weiterhin können die Variablen *Flächeninhalt* und *Lage des Reaktionsholzes*, *Abstand des Reaktionsholzes von der Markröhre* und *Flächeninhalt der Stammscheibe* automatisiert berechnet werden. Bei der Erprobung des Verfahrens wurde die Variable *Lage des Reaktionsholzes* als Abweichungswinkel von Nord ermittelt.

3.2 Untersuchungsmaterial

In einer vertiefenden Untersuchung im Rahmen des Projektes „*Das Baumwachstum von kronenspannungsfrei gewachsenen Fichten (Picea abies (L.) Karst.) unter besonderer Berücksichtigung der holztechnologischen Eigenschaften und der forstökonomischen Konsequenzen*“ am Freiburger Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, gefördert durch das Land Rheinland-Pfalz, konnten insgesamt 337 Stammscheiben untersucht werden, die von 34 Versuchsbäumen aus verschiedenen Stammhöhen entnommen wurden. Zum Zeitpunkt der Untersuchung lagen die Stammscheiben in Rinde und in luftgetrocknetem Zustand vor. Sie wurden auf ihrer Oberseite (Richtung Krone) mit einem Bandschleifgerät geschliffen⁵, um das Reaktionsholz an einer optimalen Oberfläche möglichst klar erkennen zu können.

4 Methodisches Vorgehen

4.1 Fotografieren der Stammscheiben

Für die Fotografien stand eine Digitalkamera des Fabrikats Nikon COOLPIX 990 zur Verfügung. Beim Fotografieren wurde jede Stammscheibe nach den kartografischen Himmelsrichtungen orientiert, so dass ihre Nordrichtung im Bild senkrecht nach oben zeigt. Die Bilder besitzen eine Größe von 2048×1536 Pixel (Auflösung 300× 300 dpi, Farbtiefe 8 bit) und sind im JPG-Format abgespeichert (Komprimierung auf ca. 1/4 der Originalgröße).

Von besonderer Bedeutung beim Fotografieren der Stammscheiben waren einheitliche Aufnahmebedingungen

⁵ Körnung Grobschliff: 40, Feinschliff: 120

gen, um die Vergleichbarkeit der auf den Bildern gemessenen Daten zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang kommen sowohl der Einstellung des Kameraobjektivs als auch dessen Position zur abgelichteten Stammscheibe und den Lichtverhältnissen besondere Beachtung zu:

Einstellung und Position des Kameraobjektivs: Das Zoomobjektiv der Kamera (Brennweite $f = [8 \text{ mm}; 24 \text{ mm}]$)⁶ wurde auf eine konstante Brennweite ($f = 11,6 \text{ mm} (\times 1,00)$) eingestellt, um zu gewährleisten, dass die Größenverhältnisse der fotografierten Stammscheiben sowie der Maßstab einheitlich abgebildet werden. Des Weiteren entsteht beim Fotografieren ein Abbildungsfehler, die sogenannte Verzeichnung, die im Nachhinein standardisiert korrigiert werden kann, sofern alle Bilder mit derselben Brennweite erstellt wurden.

Aus denselben Gründen blieb die Position des Kameraobjektivs ebenfalls unverändert: Es befand sich bei jeder Aufnahme auf einer Orthogonalen über dem Bildmittelpunkt in einem konstanten Abstand zur Stammscheibe (2,50 m). Der Bildmittelpunkt ist mit der Markröhre⁷ der fotografierten Stammscheibe identisch.

Lichtverhältnisse: Die Ermittlung des Flächeninhalts von Reaktionsholzbereichen an den digitalen Bildern basiert auf einer Diskriminierung des Reaktionsholzes und des Normalholzes anhand unterschiedlicher Farbwerte. Nur bei konstanten Lichtverhältnissen kann die tatsächliche Färbung (Farbwerte) von Reaktions- und Normalholz in den Bildern einheitlich wiedergegeben werden, so dass die Ergebnisse der Flächenberechnungen vergleichbar sind. Die zu fotografierenden Stammscheiben wurden in feuchtem Zustand und in einem von Tageslicht unbeeinflussten Raum mit vier Scheinwerfern (jeweils 500 W) beleuchtet. Das Blitzgerät löste bei jeder Aufnahme mit konstanter, maximal möglicher Lichtintensität aus.

4.2 Bearbeitung und Auswertung der digitalen Bilder

Die Bearbeitung und Auswertung der digitalen Bilder erfolgte in zwei Arbeitsschritten. Zuerst wurden mittels des Programms Adobe Photoshop 4.0 die Bilder von allen Stammscheiben in Grauwertbilder umgewandelt: Die Bildelemente Stammscheibe, Bildhintergrund, Reaktionsholz und Markröhre unterscheiden sich dann durch deutlich unterschiedliche Grauwerte. Alle anderen Bildelemente sind herausgefiltert und damit nicht mehr erkennbar. In einem zweiten Schritt erfolgte die Berechnung von Flächeninhalt und/oder Lage der Bildelemente vollständig automatisiert mittels eines Makros⁸ für das Programm Scion Image (Scion Corporation).

⁶ entspricht $f = [38 \text{ mm}; 115 \text{ mm}]$ bei Kleinbildkameras

⁷ gemeint ist die an der geschliffenen Stammscheibenoberseite im Querschnitt punktförmig erkennbare Markröhre

⁸ Die Makros wurden am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft durch Dipl.-Volkswirt C. Karsch erstellt.

Bildbearbeitung im Photoshop: Bei dem ersten Arbeitsschritt, der manuellen Bildbearbeitung im Photoshop, wurde jede Stammscheibe im Bild unter Anwendung des Werkzeuges *Lasso* mit dem Cursor umfahren⁹, um ihre Fläche vom Bildhintergrund abzugrenzen. Unter Verwendung des Werkzeuges *Zauberstab (Magic Wand)* erfolgte ‚per Mausklick‘ eine Markierung der Reaktionsholzbereiche. Die einzelnen Reaktionsholzbereiche konnten nach Jahrringen getrennt erfasst werden (Abb. 1).

Bei der Markierung eines Reaktionsholzbereiches mit dem *Zauberstab* registriert die Software den Farbton der mit dem Cursor erfassten Pixel und schließt daraufhin diese und alle angrenzenden Pixel mit ähnlichem Farbton zu einer markierten Fläche zusammen. Der Toleranzbereich dieser Farberkennung ist variabel und liegt zwischen 0 und 255: Bei einem hohen Toleranzwert (z. B. 100) schließt das Programm alle Pixel innerhalb eines breiten Farbspektrums um den Farbwert der mit dem Cursor erfassten Pixel zu einer markierten Fläche zusammen; die markierte Fläche ist dementsprechend groß. Umgekehrt verengt sich dieses Farbspektrum bei einem geringen Toleranzwert. Bei der Markierung des Reaktionsholzes blieb der Toleranzwert unverändert bei 32, um die Abgrenzung des Reaktionsholzes vom Normalholz einheitlich zu gestalten. Dieser Toleranzwert hatte sich in Vorversuchen als optimal für eine möglichst genaue Abgrenzung des Reaktionsholzes vom Normalholz erwiesen. Neben den genannten Bildelementen wurde auch die Markröhre durch eine entsprechende Markierung hervorgehoben.

Die Markierung der Bildelemente *Stammscheibe/Bildhintergrund*, *Reaktionsholz* und *Markröhre* ermöglichte deren ‚Einfärbung‘ in verschiedene Grautöne (Grauwerte; Abb. 2). Eine bei allen Bildern einheitliche Farbgebung schaffte die Voraussetzung für die automatisierten Berechnungen anhand der Grauwertbilder in Scion Image.

Automatisierte Berechnungen in Scion Image: Im Gegensatz zum ersten Arbeitsschritt, bei dem die Bearbeitung jedes Bildes manuell am PC erfolgen muss, konnten im zweiten Schritt die Berechnungen in Scion Image vollständig automatisiert mit Hilfe eines Makros durchgeführt werden. Anhand der Bilder wurden für jede Stammscheibe folgende Daten berechnet und ausgegeben:

$$RF = \frac{RW}{360^\circ} \times RP$$

Für jede Reaktionsholzteilfläche:
Flächeninhalt, Lage¹⁰ in xy-Koordinaten

Für die Markröhre:
Lage in xy-Koordinaten

⁹ ohne Rinde

¹⁰ Das Programm Scion Image legt eine Ellipse um ein erfasstes Bildelement und gibt die Koordinaten des Mittelpunktes der Ellipse an.

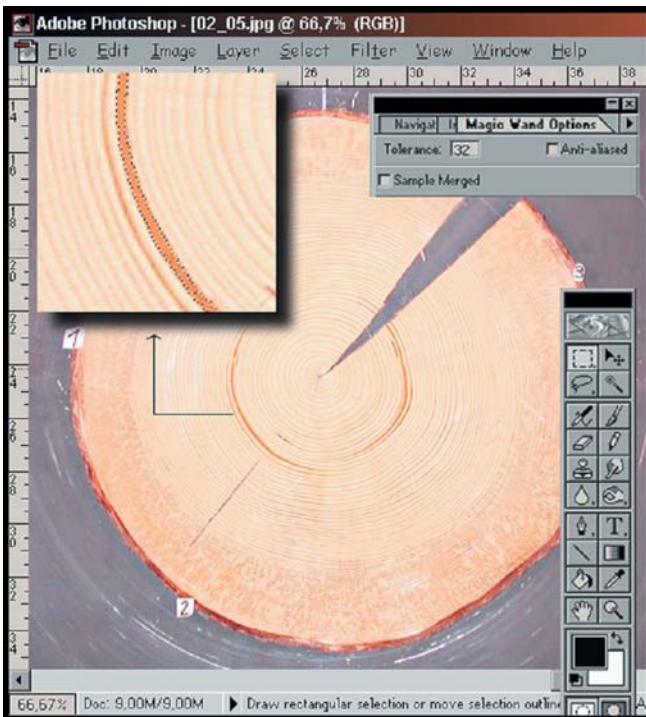


Abb. 1 Erfassung und Markierung der Reaktionsholzbereiche im Photoshop. Im Fenster Magic Wand Options kann der Toleranzbereich des Werkzeuges Zauberstab (Magic Wand) eingestellt werden

Fig. 1 Identifying and marking of compression wood areas in Photoshop. The tolerance of the magic wand tool can be set in the window Magic Wand Options

Für die Stammscheibe:
Flächeninhalt

Diese Daten wurden ebenfalls automatisiert in eine vorgefertigte (Microsoft) Excel-Tabelle übertragen, um zunächst aus den xy-Koordinaten die Lage der Reaktionsholzteilflächen als Abweichungswinkel von Nord zu berechnen, und um die Daten anschließend mit statistischen Methoden zu analysieren.

Die Funktion *Density Slice* des Programms Scion Image bietet die Möglichkeit, mit verschiedenen Grauwerten belegte Bildelemente getrennt zu erfassen und ihren Flächeninhalt und ihre Lage in Form von xy-Koordinaten zu berechnen. Besitzen mehrere nicht zusammenhängende Bildelemente denselben Grauwert – zum Beispiel alle Reaktionsholzteilflächen eines Bildes – so werden sie automatisch nummeriert und die zu berechnenden Daten für jede Teilfläche getrennt ausgegeben. Abbildung 3 zeigt das Grauwertbild einer Stammscheibe, in dem die Reaktionsholzteilflächen erfasst wurden. Diese sind rot gekennzeichnet. In Abbildung 4 wird ein Beispiel für die Nummerierung der Reaktionsholzteilflächen und die Ausgabe der Flächeninhalte (*Area*) und xy-Koordinaten dargestellt. Die Ausgabe der berechneten Daten erfolgt in einem separaten Fenster (*Results*).

Das Fenster LUT rechts in Abbildung 3 zeigt ein kontinuierliches Spektrum von Grauwerten zwischen weiß

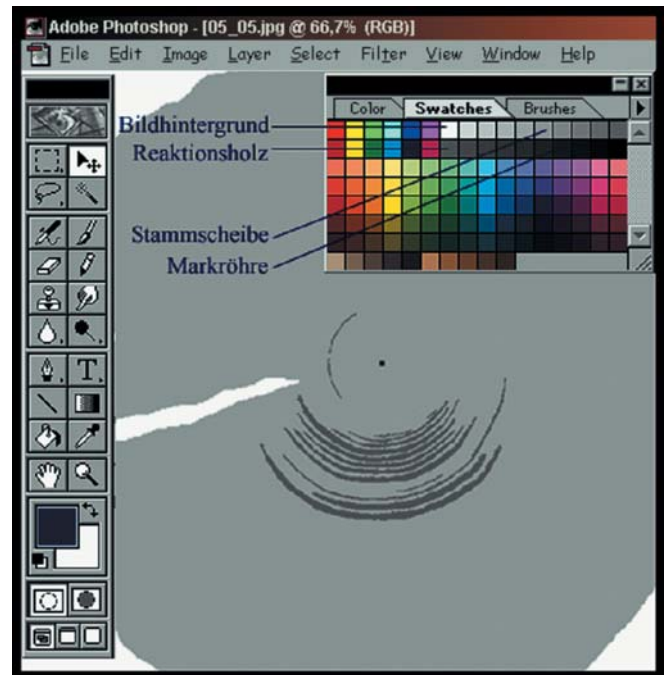


Abb. 2 Grauwertbild einer Stammscheibe – die Reaktionsholzteilflächen sowie die Markröhre und die Stammscheibe sind mit verschiedenen Grauwerten ‚eingefärbt‘. Im Fenster Swatches (Farbfelder) sind die Grauwerte der einzelnen Bildelemente beschriftet

Fig. 2 Greyscale image of a disc – compression wood areas, the pith and the disc show different greyscale values which are labelled in the window Swatches

und schwarz an. Hier kann das Spektrum der zu erfassenden Grauwerte eingestellt werden, der Bereich zwischen der oberen und der unteren Grenze des eingestellten Spektrums ist rot gekennzeichnet. Die Grauwerte des Bildes aus diesem Spektrum treten ebenfalls durch eine rote Färbung hervor. Sollen nur Bildelemente mit einem bestimmten Grauwert erfasst werden, so wird im Fenster LUT ein sehr enges Spektrum um diesen Grauwert gewählt. Dies war bei der Erfassung der Reaktionsholzteilflächen sowie bei der Erfassung der Markröhre der Fall. Um die Gesamtfläche der Stammscheibe zu erfassen, wurde ein weites Spektrum gewählt, das die Grauwerte der Stammscheibe sowie der Reaktionsholzteilflächen und der Markröhre einschließt und vom weißen Bildhintergrund abgrenzt.

Die Berechnung erfolgte in drei Teilschritten:

1. Erfassung und Nummerierung der Reaktionsholzteilflächen, Berechnung des Flächeninhalts und der xy-Koordinaten für jede Teilfläche, Ausgabe als Textdatei (*.txt)
2. Erfassung der Markröhre, Berechnung der xy-Koordinaten, Ausgabe als Textdatei
3. Erfassung der Stammscheibe, Berechnung des Flächeninhalts, Ausgabe als Textdatei

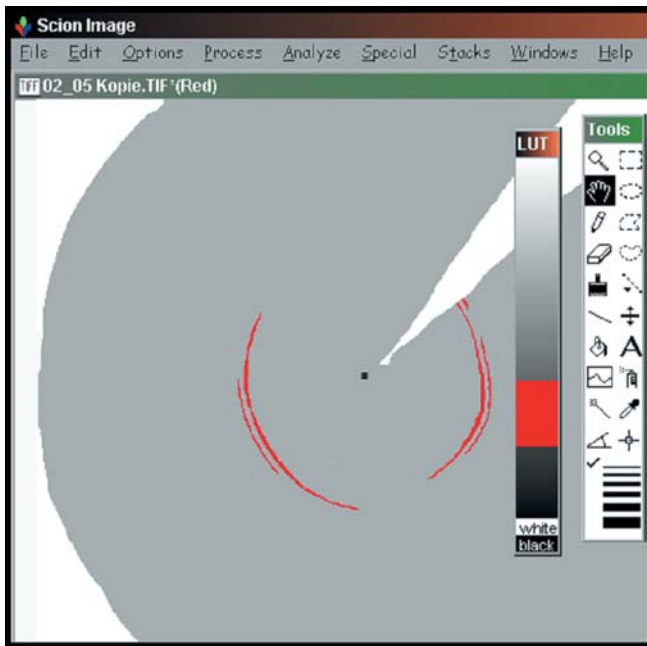


Abb. 3 Grauwertbild einer Stammscheibe in Scion Image. Die Reaktionsholzteilflächen sind rot hervorgehoben. Im Fenster LUT kann das Spektrum der erfassten Grauwerte anhand des roten Balkens eingestellt werden

Fig. 3 Greyscale image of a disc in Scion Image. Compression wood areas are highlighted in red. The spectrum of the highlighted greyscale values can be set in the window LUT

Die Textdateien entsprechen der Ausgabe im Fenster *Results* (Abb. 4). Durch das Makro wird eine automatische Übertragung der Textdateien in eine Excel-Tabelle vorgenommen.

Zur Kalibrierung des Messvorgangs diente ein Bild, in dem eine Strecke durch den Bildmittelpunkt verläuft, deren absolute Länge bekannt ist. Sie wurde im Bild abgegriffen, mit dem Programm Scion Image die der Streckenlänge entsprechende Anzahl an Pixeln ermittelt und in Relation zur wahren Länge (in cm) gesetzt.

Berechnung der Lage des Reaktionsholzanteils als Abweichungswinkel von Nord: Die Software Scion Image definiert die Lage einzelner Bildelemente über xy-Koordinaten. Der Nullpunkt befindet sich im linken unteren Bildrand. Die auf den Stammscheiben markierte Himmelsrichtung Nord verläuft im Bild als Parallele zur Ordinate durch die Markröhre senkrecht nach oben. Aus den in Scion Image ermittelten xy-Koordinaten jeder Reaktionsholzteilfläche und den xy-Koordinaten der Markröhre berechnet sich die Lage (Himmelsrichtung) der Reaktionsholzteilflächen als Abweichungswinkel von der Nordrichtung ($N=0^\circ$) über trigonometrische Zusammenhänge. Die Berechnungen wurden anhand einer benutzerdefinierten Funktion im Programm Excel automatisch durchgeführt.

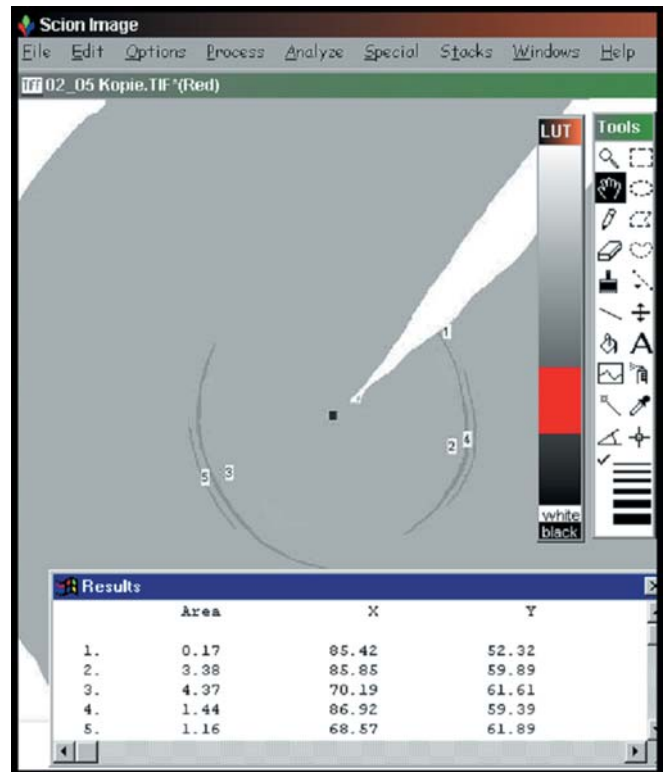


Abb. 4 Grauwertbild einer Stammscheibe in Scion Image. Nummerierung der Reaktionsholzteilflächen; Ausgabe im Fenster Results: Flächeninhalte (Area) und xy-Koordinaten der Reaktionsholzteilflächen

Fig. 4 Greyscale image of a disc in Scion Image. Numbering of compression wood areas; output data shown in the window Results: size and xy-coordinates of compression wood areas

4.3 Verzeichnung

Begriffsdefinition: Beim Fotografieren mit einer Kamera entspricht die Abbildung eines Objekts im Idealfall dem mathematischen Modell der Zentralperspektive. In der Praxis entstehen Abweichungen von der idealen zentralperspektivischen Abbildung aufgrund physikalischer Effekte, die von Luhmann (2000) als *Verzeichnung* bezeichnet werden.

Die *radial-symmetrische Verzeichnung* stellt in der Regel den größten Abbildungsfehler dar. Sie zeigt sich unter anderem darin, dass tatsächlich ebene Objekte im Bild konkav gewölbt erscheinen. Dieser Verzeichnungstyp entsteht vor allem durch Brechungsänderungen an den Linsen des Objektivs und hängt in erster Linie von der Fokussierung ab. Bei gleichbleibender Fokussierung besteht eine Abhängigkeit von der Entfernung des fotografierten Objekts. Um zu gewährleisten, dass alle Bilder dieselbe radial-symmetrische Verzeichnung aufweisen, blieb in der vorliegenden Untersuchung sowohl die Fokussierung der Kamera als auch die Entfernung zwischen Kameraobjektiv und abzulichtender Stammscheibe bei allen Aufnahmen unverändert. Eine Entfernung von 2,50 m zwischen Objektiv und Stammscheibenoberfläche sowie eine Brennweite von $f=11,6$ mm ($\times 1,00$) hat sich in

Vorversuchen als ein besonders günstiger Versuchsaufbau erwiesen.

Neben der radial-symmetrischen Verzeichnung nennt Luhmann (2000) außerdem noch die *radial-asymmetrische Verzeichnung*, die im Wesentlichen in einer Dezentrierung der Linsen im Objektiv begründet ist sowie die *Affinität* und die *Scherung* als weitere Abbildungsfehler.

Korrektur der Verzeichnung: Um die Verzeichnung zu quantifizieren, muss die Kamera auf eine bestimmte Brennweite kalibriert werden. Daher wurde bei allen Bildern dieselbe Brennweite gewählt. Bei der Kalibrierung werden unter anderem die *Parameter der inneren Orientierung* einer Kamera ermittelt. Die Kamera wird hierbei als räumliches System betrachtet, dessen Hauptbestandteile die Bildebene und das vor der Bildebene gelegene Projektionszentrum bilden. In der Bildebene befindet sich der Film bzw. bei einer digitalen Kamera der Bildsensor. Das Projektionszentrum ist im Kameraobjektiv lokalisiert. Die Parameter der inneren Orientierung geben die Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem der Kamera und die Abweichungen von der idealen zentralperspektivischen Abbildung an. Für die Korrektur der Verzeichnung wird unter anderem der sogenannte *Bildhauptpunkt*¹¹ berechnet. Die Gerade *Projektionszentrum – Bildhauptpunkt* bildet die optische Achse. Die Korrektur der Verzeichnung erfolgt im Resamplingverfahren: An einer Bildposition i' , j' im zu korrigierenden Bild wird zum tatsächlichen Bildstrahl die Lage (Winkel zur optischen Achse) des zugehörigen idealen Bildstrahls (ohne Verzeichnung) anhand der Verzeichnungsparameter berechnet. Dieser schneidet die Bildebene an der tatsächlichen/korrigierten Position i , j . Die Farbinformation, das heißt der Farbwert der Bildposition i' , j' wird anschließend auf die tatsächliche Position i , j übertragen. Entsprechend wird bei der Korrektur eines gesamten Bildes mit jeder Bildposition verfahren. Die Bildkorrektur wird weitgehend automatisiert am PC mittels geeigneter Software durchgeführt und wurde in der vorliegenden Untersuchung vom Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven¹² vorgenommen.

Um den Verzeichnungsfehler bei den Aufnahmen dieser Arbeit einschätzen zu können, wurden von den 337 Grauwertbildern 31 für die Korrektur ausgewählt, und zwar von zehn Versuchsbäumen jeweils die Bilder der untersten Stammscheibe, einer Scheibe aus dem mittleren Stammbereich und der obersten Stammscheibe sowie das Bild, das zur Kalibrierung des Messvorgangs in Scion Image diente. Der Verzeichnungsfehler sollte bei diesen unterschiedlich großen Stammscheiben untersucht werden, da die radial-symmetrische Verzeichnung, die in der Regel den bedeutendsten Abbildungsfehler darstellt, mit

dem Abstand vom Bildhauptpunkt (\approx Bildmittelpunkt) zunimmt. Um den Verzeichnungsfehler zu quantifizieren, wurden die Reaktionsholzteilflächen und die jeweilige Stammscheibenquerschnittsfläche in Scion Image anhand der korrigierten Bilder berechnet und die Ergebnisse denen der unkorrigierten Bilder gegenübergestellt. Zur Kalibrierung des Messvorganges diente das korrigierte Bild, das eine Messstrecke enthält, deren absolute Länge bekannt ist.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Ergebnisse der Verzeichnung

In den Tabellen 1 und 2 sind die Ergebnisse der Variable *Summe der Reaktionsholzteilflächen einer Stammscheibe*, im Folgenden kurz als *Reaktionsholzfläche* bezeichnet, und der Variablen *Stammscheibenquerschnittsfläche* dargestellt, die anhand der korrigierten Bilder (,ohne Verzeichnung‘) und der entsprechenden unkorrigierten Bilder (,mit Verzeichnung‘) berechnet wurden. Von drei Stammscheiben konnte die Querschnittsfläche aufgrund eines Bildfehlers nicht berechnet werden.

Den Tabellen 1 und 2 ist zu entnehmen, dass sich die Bilder ,mit Verzeichnung‘ und ,ohne Verzeichnung‘ kaum voneinander unterscheiden. Dies spiegeln die geringen Werte der Differenzen im Vergleich zu den Werten der berechneten Flächen wieder. Zudem sind die Streuungen der Differenzen relativ klein, so dass in der Regel auch die Einzelwerte ,mit Verzeichnung‘ und ,ohne Verzeichnung‘ wie die Mittelwerte absolut nur wenig voneinander abweichen.

Trotz der geringen absoluten Abweichungen zwischen den Mittelwerten der Reaktionsholzfläche bzw. der Stammscheibenquerschnittsfläche ,mit Verzeichnung‘ und ,ohne Verzeichnung‘ sind diese nach dem paarweisen t-Test sowohl insgesamt als auch für die Stammbereiche signifikant.

Werden die prozentualen Abweichungen¹³ bei der Reaktionsholzfläche bzw. der Stammscheibenquerschnittsfläche berechnet, so liegen die Werte sowohl insgesamt als auch innerhalb der Stammbereiche unter einem Prozent.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass durch die Verzeichnung der Bilder die Anwendbarkeit des Verfahrens nicht beeinträchtigt wird.

5.2 Diskussion

Die Erfassung des Reaktionsholzes im Photoshop erfolgt bei jedem Bild manuell, indem ein Bediener die Reaktionsholzbereiche mit dem Cursor markiert. Wie bei allen Methoden, bei denen das Reaktionsholz nach visuellen Kriterien erfasst wird (z. B. dem Planimetrie-Verfahren), gibt es auch bei dem vorgestellten neuen Verfahren

¹¹ Der Bildhauptpunkt entspricht dem Lotfußpunkt des Projektionszentrums zur Bildebene.

¹² Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG) der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Ofener Straße 16, D-26121 Oldenburg

¹³ Die prozentuale Abweichung wird als Verhältniswert zwischen dem Mittelwert der Differenz und dem entsprechenden Mittelwert ,ohne Verzeichnungsfehler‘ definiert (Tabellen 1 und 2).

Tabelle 1 Quantifizierung des Verzeichnungsfehlers: Reaktionsholzfläche (= Summe der Reaktionsholzteilflächen einer Stammscheibe), berechnet aus 30 Bildern jeweils mit und ohne Verzeichnung; Differenz der Werte mit und ohne Verzeichnung; Signifikanz ($\alpha=0,05$) bei paarweisem t-Test zwischen den Werten mit und ohne Verzeichnung

Stammbereich	n	Mit Verzeichnung		Ohne Verzeichnung		Differenz		Signifikanz
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
		[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	
Unten	10	37,29	24,12	37,06	24,08	0,229	0,167	*
Mitte	10	63,99	42,41	63,49	42,24	0,498	0,246	*
Oben	10	29,87	13,83	29,73	13,76	0,144	0,186	*
Gesamt	30	43,72	31,94	43,43	31,78	0,290	0,248	*

* Signifikante Unterschiede (paarweiser t-Test, $\alpha=0,05$)

– Keine signifikanten Unterschiede

Tabelle 2 Quantifizierung des Verzeichnungsfehlers: Stammscheibenquerschnittsfläche, berechnet aus 27 Bildern jeweils mit und ohne Verzeichnung; Differenz der Werte mit und ohne Verzeichnung; Signifikanz ($\alpha=0,05$) bei paarweisem t-Test zwischen den Werten mit und ohne Verzeichnung

Stammbereich	n	Mit Verzeichnung		Ohne Verzeichnung		Differenz		Signifikanz
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
		[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	
Unten	7	4241,94	617,78	4223,20	616,64	18,743	2,224	*
Mitte	10	2360,19	964,24	2344,54	961,89	15,652	2,488	*
Oben	10	703,09	683,36	698,28	677,80	4,809	5,687	*
Gesamt	27	2234,31	1601,43	2221,87	1594,99	12,437	7,179	*

* Signifikante Unterschiede (paarweiser t-Test, $\alpha=0,05$)

– Keine signifikanten Unterschiede

Grenzfälle, bei denen die Unterscheidung zwischen Reaktions- und Normalholz stark subjektiv geprägt ist: zum Beispiel bei der Differenzierung zwischen Reaktionsholz und breiten Spätholzbändern oder zwischen blass rötlich gefärbtem Reaktionsholz und insgesamt relativ dunkel gefärbtem Normalholz. Bei dem digitalen Bildauswertungsverfahren besteht für den Bediener die Möglichkeit, durch Veränderung der Bildgröße bzw. der Größe von Bildausschnitten und durch vergleichende Betrachtung mehrerer Bilder die Entscheidung abzusichern.

Auch bei dem im Stand des Wissens (Absatz 2) beschriebenen Verfahren von Andersson und Walter (1995) kann die farbliche Differenzierung zwischen Normal- und Reaktionsholz nicht vollständig automatisiert und standardisiert werden. Bei jedem Bild einer Stammscheibe definiert ein Bediener die Farbwerte jedes Holztypus – *normal wood*, *mild* und *severe compression wood* – erneut anhand von zwölf Pixeln.

Die Vorteile dieser Methode gegenüber der planimetrischen Erfassung von Reaktionsholz sehen Andersson und Walter (1995) unter anderem in einer größeren Objektivität und in einer rascheren Durchführung des Verfahrens. Ähnliches dürfte bei dem hier vorgestellten digitalen Bildauswertungsverfahren gelten:

Während bei dem Planimetrie-Verfahren der Anwender nach visuellen Kriterien entscheidet, wo die Grenzli-

Table 1 Quantifying the inaccuracy/lens distortion of the photographs: compression wood area (= total compression wood area of a disc) calculated from both 30 inaccurate images and the corresponding accurate ones; difference calculated from the corresponding data; paired t-test between the corresponding data, significance on a level of $\alpha=0.05$

Table 2 Quantifying the inaccuracy/lens distortion of the photographs: area of the disc calculated from both 27 inaccurate images and the corresponding accurate ones; difference calculated from the corresponding data; paired t-test between the corresponding data, significance on a level of $\alpha=0.05$

nie zwischen Normal- und Reaktionsholz zu ziehen ist, erfolgt bei dem digitalen Bildauswertungsverfahren die Abgrenzung der Reaktionsholzbereiche vom Normalholz, indem die Software zwischen den Farbwerten der beiden Holztypen differenziert. Bei konstantem Toleranzwert dieser Farberkennung wird die Grenzlinie immer in derselben Weise gezogen, so dass geringere Variationen in der Größe der erfassten Flächen auftreten müssten und daher von einer weitgehenden Objektivität ausgegangen werden kann. Zusätzlich besteht bei dem Durchpausen von Reaktionsholzflächen auf Millimeterpapier das Problem, die Grenzlinie optisch genau erkennen zu können. Auch dieses Problem entfällt bei der automatischen Abgrenzung.

Darüber hinaus erlaubt dieses neue Verfahren der digitalen Bildauswertung raschere Messungen. Beim digitalen Bildauswertungsverfahren werden die Reaktionsholzbereiche per Mausklick markiert, wohingegen sie bei dem planimetrischen Verfahren aufwendig auf Millimeterpapier übertragen werden müssen. Des Weiteren erfolgt die Berechnung der Daten *Flächeninhalt* und *Lage* der Reaktionsholzbereiche anhand der im Photoshop bearbeiteten Bilder vollständig automatisiert mittels eines Makros für die Programme Scion Image und Excel. Auf der anderen Seite entfällt bei dem Planimetrie-Verfahren

als erster Arbeitsschritt das Fotografieren der Stammscheiben.

Ebenso wie in der vorliegenden Untersuchung wurden von Nyström und Kline (1999) Farbbilder verwendet, um mittels digitaler Bildanalyse Reaktions- und Normalholz anhand von Farbunterschieden zu diskriminieren. Im Gegensatz zu der vorliegenden Untersuchung erfolgten die Aufnahmen nicht an luftgetrockneten, vor dem Fotografieren angefeuchteten Stammscheiben und mit einer Flächenkamera, sondern an saftfrischem (feuchtem) Schnittholz, das unter einer Zeilenkamera hindurchgeführt wurde. Auch bei saftfrischem Holz tritt das Reaktionsholz durch eine rötliche Farbe hervor. Dies wurde von Nyström und Kline (ebenda) zur Erkennung des Reaktionsholzes innerhalb des Normalholzes genutzt. Während bei dem hier vorgestellten Verfahren das Reaktionsholz von einem Bediener per Mausclick erfasst wird, erfolgt bei dem Verfahren von Nyström und Kline (ebenda) die Erkennung des Reaktionsholzes automatisiert. Dies ist besonders im Hinblick auf eine sehr rasche industrielle Klassifizierung und Sortierung von Schnittholz von Interesse. Ein Vergleich der automatischen Erkennung und Klassifizierung mit einer visuellen/manuellen Ansprache ergab, dass durchschnittlich 89% der Reaktionsholzflächen zutreffend klassifiziert wurden. Da bei dem hier vorgestellten digitalen Bildauswertungsverfahren ohnehin eine visuelle Ansprache des Reaktionsholzes durch den Bediener erfolgt, die zudem durch Veränderung der Bildgröße oder durch eine vergleichende Betrachtung mehrerer Bilder abgesichert werden kann, wird vermutet, dass das Reaktionsholz mit größerer Präzision erkannt und auch gemessen wird als dies bei den Verfahren mit höherem Automatisierungsgrad möglich ist. Des Weiteren bietet das hier vorgestellte Verfahren die Möglichkeit, den Flächeninhalt und die Lage einzelner Reaktionsholzteilflächen getrennt zu erfassen und zu messen. Es eignet sich aus diesen Gründen besonders für eine sehr detaillierte und präzise Datenerhebung in wissenschaftlichen Untersuchungen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblicke

Die Erprobung des digitalen Bildauswertungsverfahrens und die Quantifizierung des Verzeichnungsfehlers lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

Anhand von digitalen Fotografien von Stammscheiben können Reaktionsholzbereiche jahringweise erfasst sowie deren Flächeninhalt und Lage nach Himmelsrichtungen automatisiert berechnet werden. Ein bedeutender Vorteil des Verfahrens gegenüber anderen Methoden wird darin gesehen, dass die Reaktionsholzbereiche am PC sehr rasch markiert werden können. Die Berechnung der Daten erfolgt weitestgehend automatisiert und innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums.

Die Reaktionsholzbereiche werden mit der Methode jahringweise erfasst, so dass eine genauere Messung des Reaktionsholzanteils erfolgt als beispielsweise bei einer Messung von reaktionsholzbeeinflussten Bereichen über

mehrere Jahringgrenzen hinweg. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass der Flächeninhalt und die Lage jedes Reaktionsholzbereichs getrennt berechnet werden. Zusätzlich kann der Abstand jedes Reaktionsholzbereichs von der Markröhre ermittelt werden. Damit liegt als Ergebnis der Datenerhebung ein detaillierter Datensatz vor, der im Hinblick auf verschiedene Fragestellungen ausgewertet werden kann. Neben der Bearbeitung und Auswertung digitaler Fotografien von Stammscheiben besteht auch die Möglichkeit, das Verfahren bei Bildern von Schnittholzquerschnitten anzuwenden, die mit einem Scanner erstellt wurden.

Bei dem Vergleich mit anderen Verfahren ist zu berücksichtigen, dass das Fotografieren der Stammscheiben relativ zeitaufwändig ist. Um die Genauigkeit der Messungen und den Zeitaufwand des digitalen Bildauswertungsverfahrens mit anderen Methoden zu vergleichen, müssten mit den zu beurteilenden Methoden vergleichende Messungen an demselben Versuchsmaterial durchgeführt und durch Zeitstudien begleitet werden. In diesem Zusammenhang wäre auch die Frage interessant, ob bei den verschiedenen Methoden das Spätholz in die erfasste Reaktionsholzfläche mit einbezogen wird.

Die Präzision des Verfahrens, das heißt die korrekte Grenzziehung zwischen Reaktions- und Normalholz, wäre außerdem an mikroskopischen Schnitten zu überprüfen.

In weitergehenden methodischen Arbeiten wäre zu testen, ob nicht nur die Messung, sondern auch die Markierung der Reaktionsholzbereiche bei dem hier vorgestellten digitalen Bildauswertungsverfahren automatisiert werden kann, ohne die Präzision des Verfahrens zu verringern.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Erweiterung des Verfahrens wäre die Unterscheidung zwischen verschiedenen Intensitätsstufen von Reaktionsholz anhand der Ausprägung der rötlichen Färbung, da ein Zusammenhang zwischen der Intensität des Reaktionsholzes und den Verwerfungen bei der Schnittware angenommen wird (Andersson und Walter 1995). Um weitgehend objektive Messwerte zu erhalten, müsste die Farberkennung bzw. die Klassifizierung in verschiedene Intensitätsstufen standardisiert durch eine entsprechende Software und nicht durch den Bediener erfolgen.

Bei der Erprobung des Verfahrens wurde neben dem Reaktionsholz auch das Vorkommen von Harzgallen untersucht. Die Eignung des Verfahrens für weitere Holzmerkmale ist in nachfolgenden Untersuchungen zu testen.

Weitere Versuche könnten ebenfalls klären, ob das Verfahren auch bei anderen Nadelholzarten Anwendung finden kann.

Das Verfahren bietet sich besonders für wissenschaftliche Untersuchungen an, da ein detaillierter Datensatz über das Vorkommen von Reaktionsholz erstellt wird. Im Hinblick auf die Holzverwendung werden in der Regel reaktionsholzbeeinflusste Bereiche ausgeschieden, die die Ausbeute an reaktionsholzfremder Schnittware reduzieren. Bei der Anwendung des vorgestellten Verfahrens ist zu berücksichtigen, dass das Normalholz innerhalb eines

reaktionsholzbeeinflussten Bereichs zur Normalholzfläche gezählt wird.

Literatur

- Abetz P, Künstle E (1982) Zur Druckholzbildung bei Fichte. AFJZ 153:117–127
- Andersson C, Walter F (1995) Classification of Compression Wood Using Digital Image Analysis. For Prod J 45:87–92
- Bues CT (1990) Untersuchung der Holzqualität von Fichten aus unterschiedlich weit begründeten Beständen Süddeutschlands. Habilitationsschrift, Universität München
- EN 1310 (1997) Rund- und Schnittholz Messung der Merkmale
- EN 1611-1 (1999) Sortierung nach dem Aussehen von Nadelholz Teil 1: Europäische Fichten, Tannen, Kiefern und Douglasie
- ENV 1927-1 (1998) Qualitätssortierung von Nadel-Rundholz Teil 1: Fichten und Tannen
- Hagman O (1997) Multivariate prediction of wood surface features using an imaging spectrograph. HRW 55:377–382
- Knigge W (1958) Das Phänomen der Reaktionsholzbildung und seine Bedeutung für die Holzverwendung. Forstarchiv 29:4–10
- Knigge W, Schulz H (1966) Grundriß der Forstbenutzung. Paul Parey, Hamburg Berlin
- Lindgren O (1991) Medical CAT-scanning: X-ray absorption coefficients, CT-numbers and their relation to wood density. Wood Sci Technol 25:341–349
- Luhmann T (2000) Nahbereichsphotogrammetrie. Wichmann, Heidelberg
- Merforth (2000) Formstabilität von Kanthölzern aus Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) unter dem Einfluß wechselnder Holzfeuchte. Dissertation, Universität Freiburg
- Nyström J (1998) Detection of *Picea abies* compression wood with a multisensor system. In: Proceedings from the 3rd International Seminar/Workshop on Scanning Technology and Image Processing on Wood, Skellefteå, Sweden, August 17–19 1998, pp 83–89
- Nyström J (1999) Image based methods for nondestructive detection of compression wood in sawn timber. Licentiate thesis, Luleå University of Technology
- Nyström J, Hagman O (1999a) Real time spectral classification of compression wood in *Picea abies*. J Wood Sci 45:30–37
- Nyström J, Hagman O (1999b) Methods for detection of compression wood in green and dry conditions. In: Proceedings from Polarization and Color Techniques in Industrial Inspection, Munich, Germany, June 14–18 1999
- Nyström J, Kline DE (1999) Automatic classification of compression wood in green southern yellow pine. Submitted to: Wood and Fiber Science (in Nyström 1999)
- Pillow MY (1941) A New Method of Detecting Compression Wood. J Forest 39:385–387
- Seeling U (1999) Einfluß von Richtgewebe („Druckholz“) auf Festigkeit und Elastizität des Fichtenholzes. HRW 57:81–91
- Timell TE (1986) Compression Wood in Gymnosperms. Vol. 1–3. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokyo