



# Sägerei 4.0

## Schnittflächenbilder als Hilfe zur Identifizierung und Einteilung von Rundholzstämmen

### Forschungsbericht

#### Endbericht

**Bericht Nr.** 02

**Auftrag Nr.** R.008065-10-75 FE

**Datum** 6. August 2018

**Auftraggeber** Bundesamt für Umwelt BAFU - WHFF  
Werner Riegger  
Abteilung Wald  
3003 Bern

**Adresse der Forschungsstelle** Berner Fachhochschule  
Architektur, Holz und Bau  
Institut für digitale Bau- und Holzwirtschaft  
Kompetenzbereich Digitale Fertigung  
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel  
Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91  
[www.ahb.bfh.ch](http://www.ahb.bfh.ch)

**Verfasser** Nikita Aigner

**Projektverantwortlicher** Eduard Bachmann

**Institutsleiter** Rolf Baumann

## Abstract

Im vorliegenden Projekt wurden Möglichkeiten untersucht, Rundholzsortierung in einem Sägewerk mit Hilfe von Bildanalyseverfahren am Stammquerschnitt zu unterstützen.

Neben der Auffindung der Markröhre und anschliessender Auswertung der Jahrringe wurde ein Hauptaugenmerk auf die Detektion von Harzgallen gelegt.

Es war möglich, Algorithmen aufbauend auf räumlichen Korrelationen von Grauwerten zu implementieren, die einige Unregelmässigkeiten und Störfaktoren auf Stammbildern kompensieren konnten. Allerdings war im Feldversuch die Qualität vieler Stammquerschnitte aufgrund von Rissen, starken Verfärbungen und Verschmutzungen oft unzureichend, um qualitätsrelevante Parameter korrekt schätzen zu können. Der im Sortievorgang stattfindende Kappsnitt könnte einige Störfaktoren beseitigen, allerdings findet dieser zu spät im Prozess statt und das verwendete Kreissägeblatt zerstört die Holzoberfläche oft bis zur Unkenntlichkeit.

Um anstelle von Korrelationen, direkt Farbinformationen aus einem Bild zu nutzen wurden hyperspektrale Bilder in einer Laboranlage gemacht mit Nicht Negativer Matrixfaktorisierung analysiert. Dieses Verfahren erlaubte es, unterschiedliche Bereiche der Querschnitte (Druck-/Normalholz, Harz, Markröhre, Fäule) auseinanderzuhalten. Risse und andere geometrische Unregelmässigkeiten haben keinen Einfluss auf die Auswertung. Bei diesem Verfahren ist primär der Scan selber prohibitiv langsam für eine Anwendung in der Sortierung. Durch Reduktion der räumlichen, wie spektralen Auflösungen und weiterer Optimierungen kann die Methode allerdings eine äusserst attraktive Variante für die Unterstützung der Rundholzsortierung darstellen.

Speziell in Bezug auf Harzgallen hat sich gezeigt, dass sie mit UV Licht aufgrund ihrer Fluoreszenzeigenschaften weitestgehend unabhängig von den meisten Störeinflüssen gut sichtbar gemacht werden können. Die Anforderungen an die Lichtquelle sind dabei ein breites Spektrum und hohe Leistung. Diese Methode wurde zum Abschluss des Projektes in der Sortierlinie provisorisch eingebaut, um später praxisnahe Daten für weitere Entwicklungen zu sammeln.

**Keywords:** Rundholzsortierung, Bildanalyse, hyperspektral, Fluoreszenz, Harzgallen

## Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage	4
2 Zielsetzungen	5
3 Projektbeteiligte	6
4 Vorgehensweise	7
5 Bildanalyse an digitalen Fotografien im Labor (AP 1+2)	8
6 Probeaufnahmen Sägewerk (AP 3)	16
7 Hyperspektrale Bilder (ad AP 1)	20
8 Testanlage UV Belichtung und Ausblick	31
9 Schlussfolgerungen	32
10 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	33
11 Literaturverzeichnis	34

## 1 Ausgangslage

Eine heute weit verbreitetes Verfahren zur automatisierten Rundholzsortierung und Optimierung des Einschnittes im Sägewerk basiert auf Computertomographie (CT) Scannern. Diese Systeme sind allerdings mit Preisen zwischen 1.5 – 2 Mio. CHF für Klein- und Mittelständische Unternehmen prohibitiv teuer, da deren Umsatzeinbussen infolge fehlerhafter Sortierung eine Größenordnung geringer ausfallen. Die Vorsortierung von Rundholz erfolgt daher grösstenteils noch immer manuell, oft allerdings mit Unterstützung eines Laserscanners zur Bestimmung der normrelevanten Abmessungen des Stammes. Zusätzlich zu diesen Daten sind ebenfalls die Jahrringbreite und das Vorhandensein von Harzgallen ein wichtiges Beurteilungskriterium. Diese Merkmale können am Stammquerschnitt abgelesen werden und es wäre wünschenswert solche Daten möglichst reproduzierbar und automatisiert zu erfassen.

Neben Röntgenstrahlen kann eine Reihe anderer Strahlungen und Messprinzipien zur Bestimmung der Eigenschaften von Holz verwendet werden, die aus dem Bereich der zerstörungsfreien Prüfung stammen. Im Zusammenhang mit Rundholz sind dabei Schall (Legg & Bradley, 2016), Mikrowellenverfahren (e. g. Fedeli et al. 2016) und neuerdings auch die Terahertztechnologie (Koch et al. 1998) erwähnenswerte Verfahren. Die Schallgeschwindigkeit in Holz korreliert mit der Dichte des Materials und kann daher direkt Auskunft über die elastischen Eigenschaften geben. Allerdings wird diese Korrelation von (mikro)strukturellen Faktoren und Parametern wie der Materialfeuchte stark beeinflusst. Daher ist es nicht gut möglich statistisch gesicherte Aussagen über einen ganzen Stamm zu machen und zusätzlich sind die von Schallmessungen erhaltenen Steifigkeiten bereits an kleinen fehlerfreien Probekörpern mit beachtlichen Fehlern behaftet. Eine CT-ähnliche Durchleuchtung eines Stammes wäre auch mit Schall möglich. Das Verfahren wäre allerdings nur marginal kostengünstiger als die Röntgenvariante, da die Komplexität im Wesentlichen gleich ist und lediglich die Röntgenquelle als Kostentreiber entfallen würde. Mikrowellen- und Terahertzstrahlung sind elektromagnetische Strahlungen die sich in ihrer Frequenz unterscheiden. Die beiden Frequenzbanden liegen nahe beieinander und daher weisen auch beide den Mangel geringer Durchleuchtungstiefe wegen starken Interaktionen mit organischer Materie auf. Zusätzlich interagieren beide Strahlungen mit Wasser, was Aussagen über Stämme mit unbekannter und womöglich inhomogen verteilter Holzfeuchte stark beeinträchtigt.

Bildanalyseverfahren sind ein sehr breites Forschungsfeld, das von einfachen Distanzmessungen in einer Fotografie bis hin zur Nachahmung des menschlichen Sehsinnes im Sinne der Interpretation einer Szene reichen. Zumindest einige Methoden aus diesen Bereichen können im weiteren Sinn auch zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren gezählt werden. In den letzten Jahrzehnten hat die Verfügbarkeit von vergleichsweise billiger Rechenleistung und digitaler Bildsensoren einige technische Aspekte von Bildanalysen vereinfacht und das Gebiet hat enorm an Bedeutung gewonnen und ist intensiv beforscht und entwickelt worden. Während der Fokus dieser Entwicklungen primär im Bereich Erkennung von Objekten – für autonomes Fahren von Autos (Sun et al. 2004) oder Smartphones (Su et al. 2014) –, der Rekonstruktion von dreidimensionalen Objekten aus zweidimensionalen Daten im Bereich der Photogrammetrie (Remondino & El-Hakim 2006) und in der Qualitätskontrolle (Brosnan & Sun 2004) lag, ging der Trend auch an der Holzwissenschaft nicht spurlos vorbei. Speziell die Dendrochronologie konnte im Bereich der Automatisierung ihrer Analysen von den Entwicklungen in der digitalen Bildverarbeitung profitieren (Conner et al. 1998). Die dabei entwickelten Verfahren sind primär darauf spezialisiert, Jahrringbreiten zu bestimmen, um diese später mit bekannten Profilen zur Altersschätzung abzugleichen. Im industriellen Umfeld sind optische Systeme derzeit primär in der Sortierung von Sägeware im Einsatz (e. g. WoodEye AB, Sprecher Automation GmbH). Während diese Methoden robust sind und verlässliche Ergebnisse liefern, eignen sich für den Einsatz zur Rundholzsortierung im Allgemeinen nicht, da die sie von konstanter und allgemein guter Oberflächenqualität ausgehen. Bei Stammquerschnitten wie sie auf einem Rundholzplatz anzutreffen sind, können diese Voraussetzungen nicht gewährleistet werden – es ist immer mit Verschmutzungen/Verfärbungen, Rissen, Riefen und anderen Störfaktoren in der Oberfläche zu rechnen.

## 2 Zielsetzungen

Aufgrund der beschriebenen Hindernisse ist die Thematik digitaler Bildverarbeitung an Rundholz nach unserem Wissen vergleichsweise wenig untersucht. Im Wesentlichen sind zwei wichtige Autoren in diesem Zusammenhang zu erwähnen. Norrell (2010) entwickelte automatische Methoden zum Filtern von Kettensägenriefen und anschliessender Detektierung der Markröhre und der Jahrringe am Stammquerschnitt. Später beschäftigte sich Schraml (2016) mit ähnlichen Themen und weiterführenden Algorithmen zur Bildsegmentierung. Zusätzlich wurden Verfahren aus der Fingerabdruck- und Iriserkennung untersucht, um Stämme – für Zwecke der Rückverfolgbarkeit – anhand ihres Querschnittes identifizieren zu können.

Die bisherigen Arbeiten lieferten vielversprechende Ergebnisse und es sind derzeit eine Reihe weiterer Untersuchungen geplant (Schraml 2017) – die Möglichkeiten, quantitative Informationen aus digitalen Bildern von Rundholz zu extrahieren sind definitiv noch nicht erschöpft. Aus angewandter Sicht, besteht heute weiterhin Untersuchungsbedarf zur Erhöhung der Robustheit der Algorithmen und es muss deren Geschwindigkeit weiterhin erhöht werden, um Implementierungen auch der bereits vorhandenen Methoden zu ermöglichen. Schliesslich besteht auch die Notwendigkeit, sich mit dem Design geeigneter Messsetups zu beschäftigen, um auch die Datenerfassung an den Zweck und die Umgebungsbedingungen anzupassen.

In der vorliegenden Arbeit werden Bildaufnahme- sowie Bildanalysesysteme auf deren Eignung als Unterstützung in der manuellen Rindholzsortierung untersucht. Das unmittelbare Ziel besteht nicht darin, ein vollautomatisches Verfahren zur Rundholzsortierung zu implementieren. Zunächst werden fundamentalere Fragestellungen untersucht und anschliessend wird die praktische Umsetzung der Methoden abgeschätzt. Hierzu soll eine Testinstallation in der Sägerei Reinhardt in Erlenbach aufgebaut werden.

### 3 Projektbeteiligte

Thomas Lädrach  
Reinhardt Holz AG  
Bahnhofstrasse 179b  
CH - 3762 Erlenbach i. S.

Eduard Bachmann  
Nikita Aigner  
Berner Fachhochschule  
Architektur, Holz und Bau  
KB Integrierte Planung und Produktion  
Solothurnstrasse 102  
CH - 2504 Biel/Bienne

Martin Ziesak  
Berner Fachhochschule  
Hochschule für Argrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL  
Abteilung Waldwissenschaften  
Länggasse 85  
CH - 3052 Zollikofen

## 4 Vorgehensweise

Im Folgenden wird die in dieser Arbeit typischerweise verwendete Vorgehensweise für Fotografien kurz erläutert. Ein erwähnenswerter Aspekt der hier verwendeten Methodik besteht darin, dass das Bild im Allgemeinen in eine Anzahl kleiner Einheiten unterteilt wird, deren Eigenschaften (i. e. Orientierung, o. Ä.) bestimmt werden. Aus dieser Anzahl lokaler Eigenschaften werden im Anschluss die globalen Features des Objektes (Position Markröhre, Jahrringbreiten, etc.) abgeleitet. Generell erlaubt diese Vorgehensweise es, Rauschen in den Aufnahmen relativ gut zu unterdrücken. Im konkreten Fall ist allerdings zusätzlich mit Verschmutzungen und anderen Störfaktoren zu rechnen, die vergleichbar gross oder grösser, als die analysierten Subeinheiten sein können. Eine der Herausforderungen besteht also darin, auch Methoden zu finden, mit denen die Qualität der Aussage beurteilt wird, die aus einem einzelnen Bildsegment erhalten wird.

Das erste verwendete lokale Merkmal in der vorliegenden Arbeit ist die lokale Orientierung der Jahrringe des Stammquerschnittes. Auf ausreichend kleinen Bildausschnitten ist die Jahrringkrümmung vernachlässigbar und die Strukturen können als eine Abfolge von parallelen Linien mit einer klaren Orientierung approximiert werden. Der Detektion der Markröhre liegt dann die Annahme zugrunde, dass sie sich im Schnittpunkt der Normalen zu den Jahrringen befindet. In der Realität trifft diese Annahme nur bedingt zu und zusätzlich gibt es Störfaktoren bei der Bestimmung der lokalen Jahrringorientierung. Abweichungen der Jahrringe können durch eine hohe Anzahl der verwendeten Bildsegmente allerdings gut weggemittelt werden. Die zwei wichtigsten Störfaktoren sind Risse im Stamm und starke Verfärbungen, die Jahrringe verdecken. Es hat sich gezeigt, dass Risse sich durch einen stärkeren Kontrast im Vergleich zu Jahrringen auszeichnen und in vielen Fällen zur Markröhre hin verlaufen. Durch einige Filterschritte können sie verlässlich extrahiert und ebenfalls zum Abschätzen der Markröhrenposition verwendet werden. Stark verfärbte Bereiche liefern hingegen keine Information zu lokalen Orientierungen und können dementsprechend für diese Aufgabe nicht sinnvoll ausgewertet werden. Sind allerdings ausreichend klare Bereiche vorhanden, kann trotz dieser Unzulänglichkeit die Markröhrenposition abgeschätzt werden. Diese Position bildet die Grundlage für so gut wie alle weiteren Untersuchungen.

Ausgehend von der Markröhrenposition können weitere Auswertungen gemacht werden. Ein naheliegendes (und normrelevantes) Thema ist die Jahrringbreite. Aufgrund der vergleichsweise schlechten Oberflächenqualität der Querschnitte können simple Methoden aus der Dendrochronologie an dieser Stelle nicht eingesetzt werden, da sie von einem klaren Bild des Kontrastes zwischen Früh- und Spätholz ausgehen. Gute Ergebnisse wurden hier mit dem von Norrell (2010) entwickelten Verfahren entwickelt. Dieses basiert auf einer polaren Koordinatentransformation des Stammquerschnittes um die Markröhre und einer anschliessenden Suche nach kürzesten (geraden) Verbindungen in Polarkoordinaten, wobei die Distanzen mit den Grauwerten der Pixel gewichtet werden. Mit diesem Verfahren können die Positionen von Früh- oder Spätholz innerhalb eines Kreissektors detektiert werden, über den Abstände gemittelt werden können und so eine – statistisch gesehen – sinnvolle Aussage liefern.

Schliesslich kann Bildsegmentierung verwendet werden, um das analysierte Bild in unterschiedliche Bereiche einzuteilen. Ähnlich der Markröhrenbestimmung wird das Bild dabei in kleine Bereiche unterteilt und ähnliche Bereiche können zusammengefasst werden. „Ähnlich“ kann dabei zweckabhängig auf unterschiedliche Arten definiert werden. In konkreten Fall hat es sich in Anlehnung an Schraml (2016) als sinnvoll erwiesen, Mittelwerte und Standardabweichungen der Graustufen, Bildentropie und Grauerthistogramme miteinander zu vergleichen. Grenzwerte dafür, welche Segmente als „ähnlich“ oder „anders“ bezeichnet werden müssen dabei im Speziellen angepasst werden.

## 5 Bildanalyse an digitalen Fotografien im Labor

Zunächst wurden Bilder von Stammquerschnitten unter kontrollierten Bedingungen im Labor aufgenommen. Diese Versuche dienten zum einen einer ersten Implementierung und groben Parametrisierung bereits dokumentierter Methoden und zusätzlich konnten so auch erste Anhaltspunkte über kritische Faktoren für die Bildaufnahme gesammelt werden.

Im Folgenden sind erste Untersuchungen zur Erstellung digitaler Bilder von Stammquerschnitten an Fichtenabschnitten zusammengefasst. Die Qualität der Bilder wurde im Hinblick auf mehrere Aspekte evaluiert: (i) Eignung für die Bildanalyse zur Erkennung von Holzmerkmalen und (ii) Erkennung von Harzgallen und (iii) Möglichkeiten zur Implementierung des Verfahrens im Werk. In (iv) sind einige bildbasierte Auswertungen vorgestellt und schliesslich werden Schlussfolgerungen aus den hier erhaltenen Ergebnissen gezogen. Die Punkte (i) und (ii) fassen die im Rahmen des Projektes durchgeföhrte Semesterarbeit von Inauen und Moser (2017) zusammen, während Punkt (iii) auf Ergebnisse aus der im Folgesemester entstandenen Projektarbeit von Duc und Seiler (2018) zurückgreift.

### 5.1 Bildakquise zur weiteren Verarbeitung

Die Bilder wurden in erster Linie mit einer Cognex MicroVision Kamera mit 16 mm Objektiv aufgenommen, eine Bildserie wurde auch mit einer modifizierten Webcam im nahinfraroten (NIR) Bereich gemacht. Als Möglichkeiten zur Ausleuchtung der Probe wurden handelsübliche Bauscheinwerfer (mit und ohne grüner Folie als Filter für farbiges Licht) und zwei rote LED Leisten verwendet. Zusätzlich wurden die Aufnahmen mit und ohne der Verwendung eines roten Filters an der Kamera gemacht. Relevante Variationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Ausgewählte Varianten zur Bilderfassung an Stammquerschnitten und resultierende Bildqualität.

Beleuchtung	Filter	Qualität
Bauscheinwerfer	-	gut
Bauscheinwerfer	rot	gut
Bauscheinwerfer mit grüner Folie	-	brauchbar
Rote LED Leiste	-	gut
Rote LED Leiste	rot	gut
Bauscheinwerfer	NIR, Webcam	nicht brauchbar

Grundsätzlich waren sämtliche mit dem Cognex System aufgenommenen Bilder von ausreichender Qualität (vgl. Abbildung 1 a, b, d, e). Lediglich der Versuch, Stammquerschnitte mit grünem Licht (Abbildung 1 c) anzuleuchten brachte nicht die erwartete Erhöhung des Kontrastes an den Jahrringen und führte zu überbelichteten Bereichen (Sprühfarbe am Schnitt). Im NIR Bereich konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht werden (Abbildung 1 f) – in diesem Wellenlängenbereich scheint der Kontrast zwischen Früh- und Spätholz kaum vorhanden zu sein, wodurch die Daten für eine Bildanalyse unbrauchbar werden.

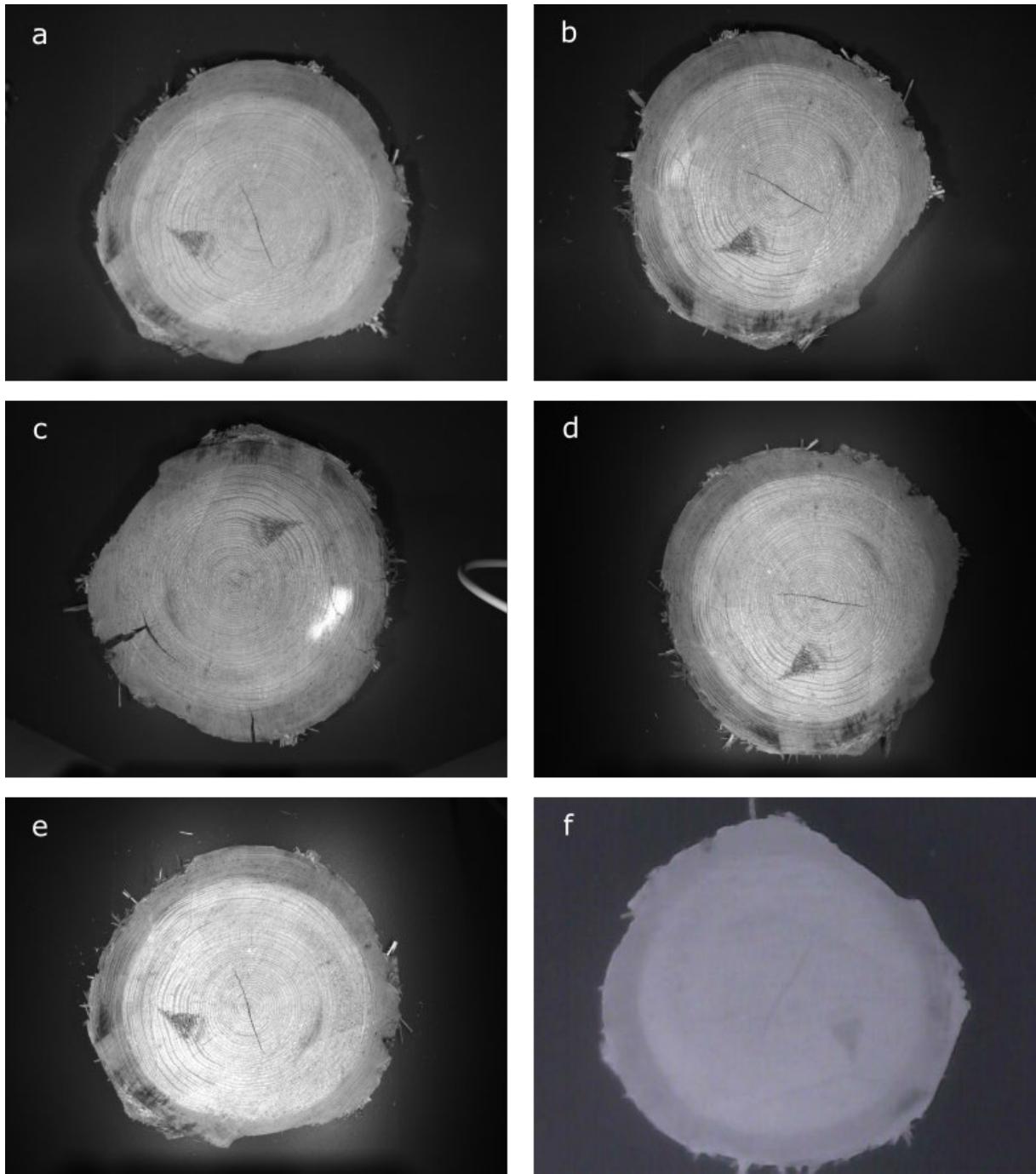


Abbildung 1: Beispiele für mit unterschiedlichen Beleuchtungen aufgenommene Bilder eines Stammquerschnittes. a: Bauscheinwerfer (BSW), ohne Filter b: BSW, mit rotem Filter c: BSW grün leuchtend, ohne Filter d: rote LED ohne Filter e: rote LED, roter Filter f: NIR

In Abbildung 2 sind Bilder eines im Wald und im Sägewerk durchgeföhrten Kappschnittes gegenübergestellt. Offensichtlich hat auch die Qualität des Schnittes einen Einfluss auf die Bildqualität. Hier hat sich gezeigt, dass der im Sägewerk getätigte Kappschnitt oft zu starken Ausrissen führt, wodurch Jahrringe nicht sichtbar werden. Es bietet sich daher an, die Bilder am im Wald durchgeföhrten Kettensägeschnitt aufzunehmen. Diese Variante scheint auch besser in den Verarbeitungsprozess der Stämme integrierbar zu sein.

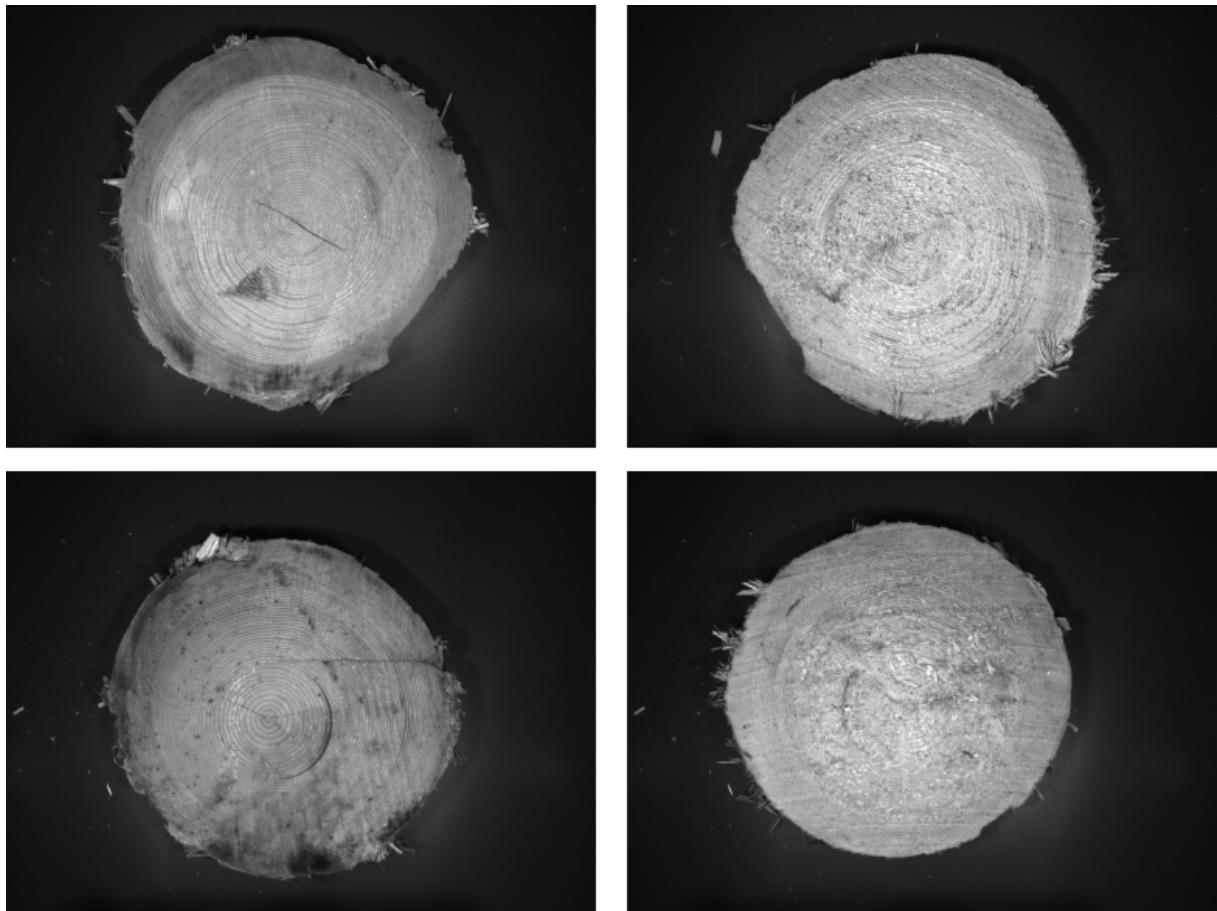


Abbildung 2: Vergleich des im Wald (links) und im Sägewerk (rechts) getätigten Kappschnittes. Während rechts oben Jahrringe noch brauchbar gut erkennbar sind, kann im rechten unteren Bild wegen des starken Ausisses selbst das Mark kaum für einen menschlichen Betrachter auffindbar.

## 5.2 Detektierung von Harzgallen mit UV Licht

Harzgallen sind aufgrund ihrer Form und Farbe an normalen Fotografien des Stammquerschnittes mittels Bildbearbeitung sehr schwer zu detektieren. Harz hat allerdings die Eigenschaft stärker als Holz zu fluoreszieren, d. h. es leuchtet vergleichsweise stark, wenn es mit UV Licht (Wellenlängen um die 395 nm – 365 nm) angestrahlt wird. Unter Verwendung eines roten Farbilters an der Kamera können so Aufnahmen wie in Abbildung 3 dargestellt gemacht werden. Die Harzgallen (und allgemein grössere Ansammlungen von Harz) stechen dabei als helle Bereiche hervor, während der Früh- und Spätholzkontrast der Jahrringe untergeht. So können Harzansammlungen ohne jegliche Bildanalyse leicht vom Betrachter erkannt werden und eine vergleichsweise einfache umsetzbare Unterstützung in der Sortierung darstellen.

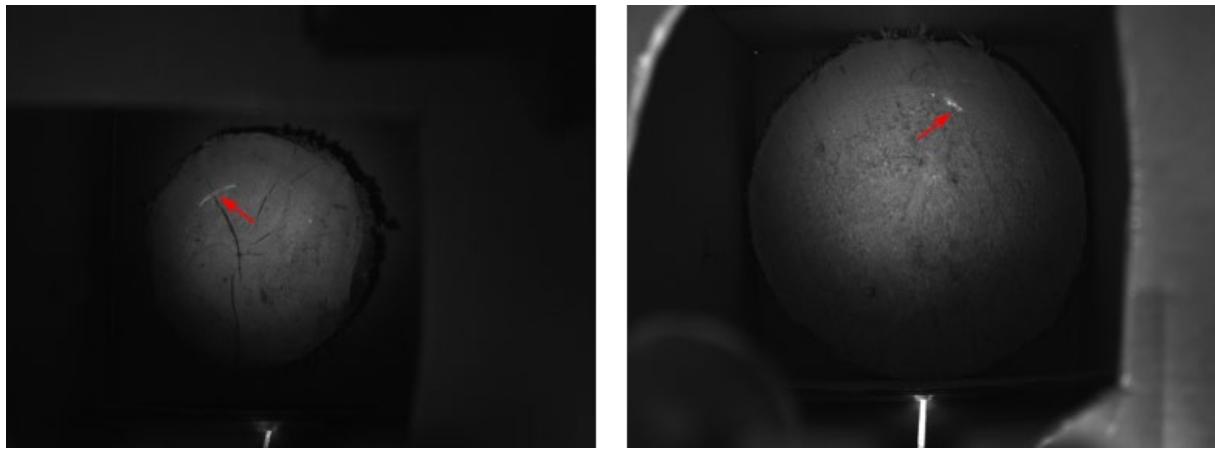


Abbildung 3: Mit UV Licht (395 nm) angeleuchtete Stammquerschnitte, aufgenommen durch einen roten Filter. Harzgallen sind als hell leuchtende Flecke zu erkennen (rote Pfeile). Links: Kapschnitt Wald. Rechts: Kapschnitt Sägewerk.

Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass vom Harz ausgehende Fluoreszenz nicht stark genug ist, um bei Tageslicht gut erkennbar zu sein. Daher müssen solche Aufnahmen in einem abgedunkelten Bereich gemacht werden. Das ist allerdings in Anbetracht der Verwendung von relativ intensivem UV Licht ohnehin empfehlenswert, um eventuelle Augenschäden zu vermeiden. Ein besonderer Vorteil der Detektierung von Harz mittels Fluoreszenz besteht darin, dass die Oberflächenqualität des Stammquerschnittes keine besondere Rolle zu spielen scheint. Wie aus Abbildung 3 (rechts) ersichtlich, ist eine Harzgalle auch im stark zerfransten Sägewerkskapschnitt noch gut erkennbar. Es bedarf allerdings noch einer eingehenderen Untersuchung, inwiefern Pilze oder andere Verunreinigungen am Stammquerschnitt, ebenfalls fluoreszieren und für die Harzgallenfindung problematisch sein können.

### 5.3 Mögliche Implementierung der Harzgallendetektion

Aufbauend auf den vielversprechend verlaufenen Versuchen mit UV Licht zur Detektion von Harzgallen, wurde die Machbarkeit eines direkt in der Sortierlinie implementierbaren Systems weiter untersucht.

Für eine systematische Testreihe wurden zunächst Leistungsdioden (4 x 5W, 365 nm und 395 nm) verwendet und mit Lastzyklen um zwischen 10 ms und 50 ms als Blitz betrieben. Kurze Lastzyklen erlauben es, Leuchtdioden mit deutlich höheren Strömen, als die Nennlast zu betreiben und so die Lichtintensität zu steigern. Der kurze Lichtimpuls sollte es schlussendlich ermöglichen, den gesamten Blitzaufbau im abgedunkelten Laserscanner zu integrieren, ohne die Stammvermessung zu stören. Bei diesen Versuchen stellte sich heraus, dass die zuvor beobachteten fluoreszierenden Eigenschaften von Harz nicht verlässlich reproduziert werden konnten. Von den zwei in Abbildung 4 enthaltenen Harzgallen ist lediglich bei der linken Fluoreszenz in Form eines Leuchtens erkennbar. Die Harzgalle am rechten Bildrand zeigt hingegen keine fluoreszierenden Eigenschaften. Zusätzlich wurde in den Bildausschnitt eine mit Bläue befallene Schindel gelegt, die allerdings ebenfalls keine speziellen optischen Eigenschaften aufwies.

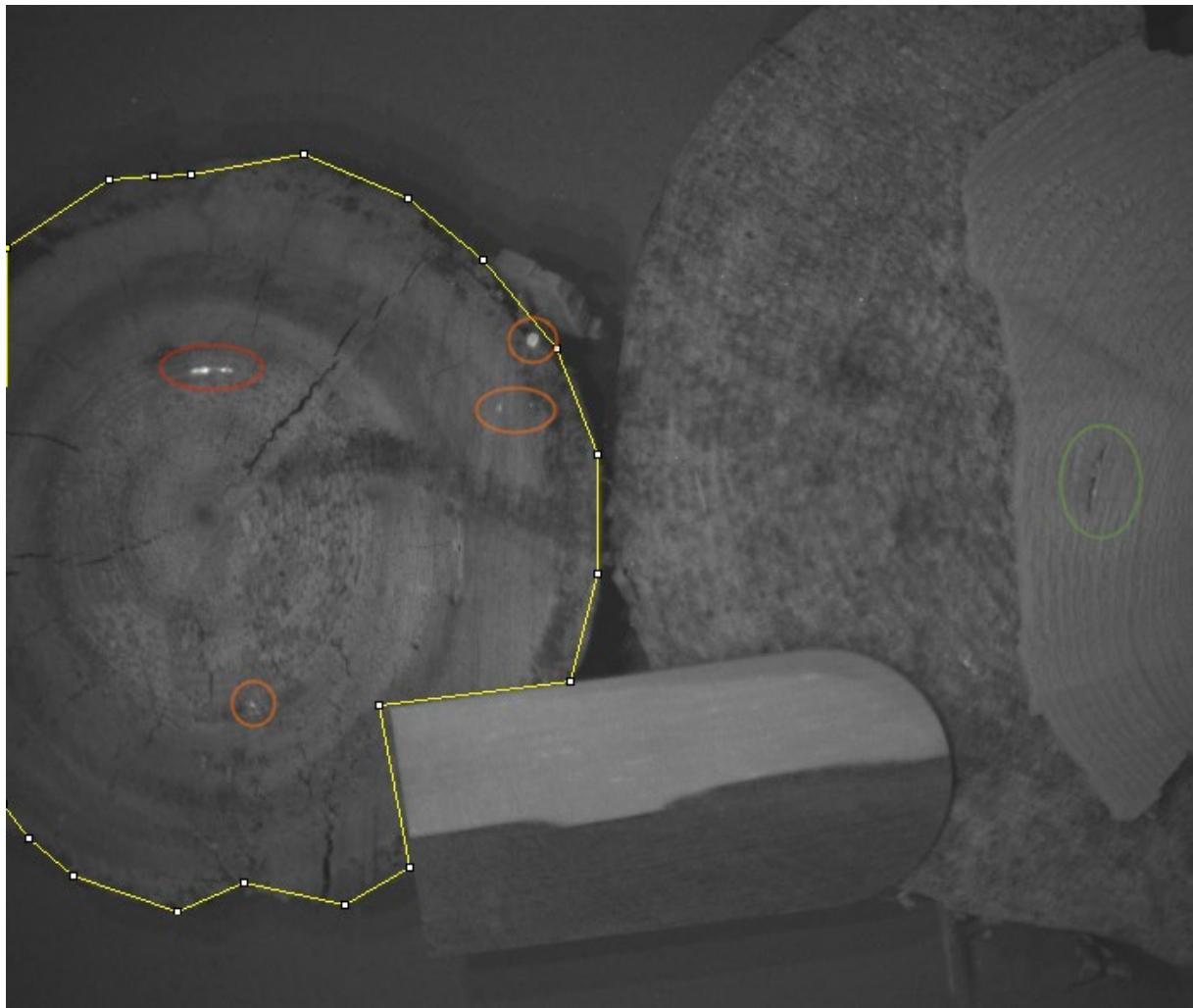


Abbildung 4: Probeaufnahme Harzfluoreszenz (395 nm, 40 ms Blitzdauer). Auf der linken Stammscheibe (gelbe Einrahmung) ist Harz als helle Flecke erkennbar (rot markiert), während rechterhand eine Harzgalle (grün markiert) dunkel bleibt. Im unteren mittleren Bildausschnitt befindet sich zusätzlich eine von Bläuepilz befallene Schindel, die allerdings keine besonderen fluoreszierenden Eigenschaften besitzt.

Es bestand die Vermutung, dass die enge spektrale Bandbreite der LED für die Anregung der Harzfluoreszenz nicht ausreichen würde. Zusätzlich deuteten die Aufnahmen auch darauf hin, dass die von der Cognex aufgelösten 256 Graustufen (8 bit) nicht ausreichen würden um die unterschiedlichen Helligkeiten sinnvoll aufzulösen. Deswegen wurde in weiteren Versuchen eine Schwarzlichtröhre verwendet, die ein vergleichsweise breites Spektrum im UV Bereich emittiert und die Kamera wurde durch einen Spiegelreflexapparat (Pentax K-7) ersetzt, der Farbbilder mit 14 bit Farbtiefe aufnahm.

Eine repräsentative Aufnahme aus dieser Testreihe ist in Abbildung 5 dargestellt. Während die Stammscheibe sich durch einen braun-bläulichen Schimmer vom Hintergrund abhebt, sind Harzflecke und -gallen an ihrem grünblauen Leuchten ebenfalls gut erkennbar (siehe auch Detail in Abbildung 5, rechts). Dieser Farbeffekt stimmt gut mit bei Bernstein beobachteten Fluoreszenzeffekten überein. Durch das breitere Spektrum der verwendeten Lichtquelle führte offensichtlich zu einer besseren Anregung der Fluorophore. Die Verwendung von Farbaufnahmen und um ein Vielfaches bessere Farbtiefe (i. e. Auflösung der Helligkeit) ermöglicht auch eine bessere Differenzierung des Harzes vom umliegenden Material.

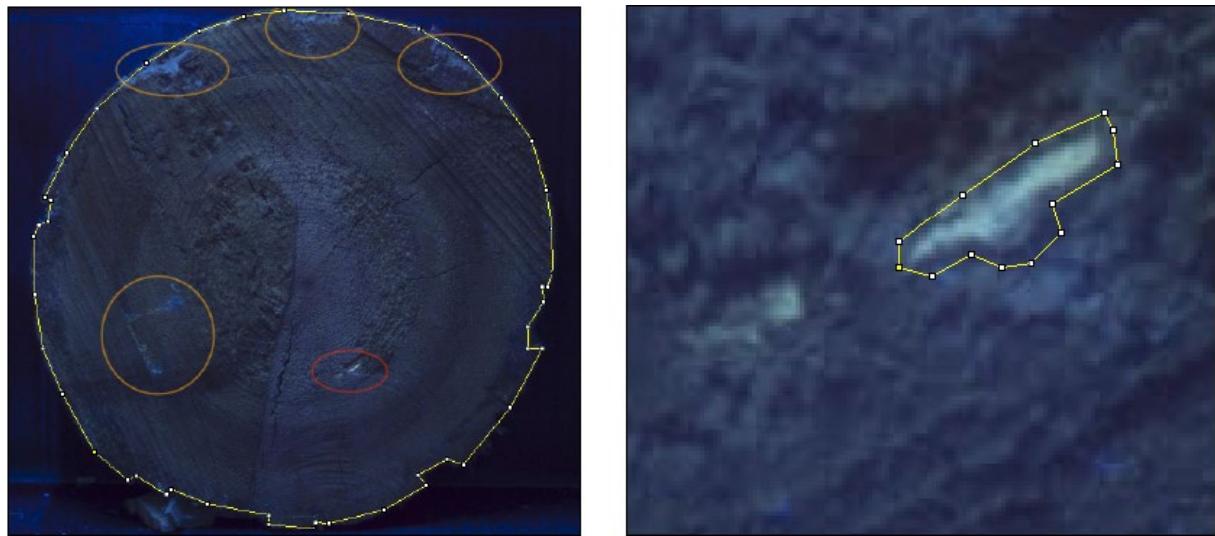


Abbildung 5: Links: Übersichtsaufnahme einer Stammscheibe mit einer Spiegelreflexkamera, belichtet mit einer Schwarzlichtröhre, fluoreszierendes Harz ist rot und orange eingekreist. Rechts: Harzgalle in rot eingekreistem Detail von links, die von Bernstein bekannte grün-blaue Fluoreszenz ist deutlich zu erkennen.

Mit dem angepassten System konnten Harzgallen reproduzierbar auf den vorhandenen Stammscheiben erkannt werden. Nachteilig hat sich allerdings ergeben, dass die Schwarzlichtröhre nicht im Blitzbetrieb verwendet werden kann, wodurch ein Einbau in den Laserscanner wegen des dauerhaft erzeugten Streulichtes nicht mehr erfolgen kann. In diesem Setup sind auch prohibitiv lange Belichtungszeiten von bis zu 30 s notwendig gewesen. Diese können allerdings durch noch intensivere UV Quellen (e. g. Quecksilber Dampflampe) reduziert werden. Das Fluoreszenzleuchten bleibt allerdings in jedem Fall schwach, weswegen eine lichtdichte Einhausung weiterhin notwendig bleibt.

#### 5.4 Durch Bildverarbeitung erkennbare Holzmerkmale

In Anlehnung an die Arbeiten von Norrell (2010) und Schraml (2016) wurden einige Methoden zur Erkennung von Stammcharakteristika implementiert. Sämtliche Methoden beruhen auf einer Reihe empirischer Parameter, die an die verfügbaren Bilder angepasst werden müssen. Sobald diese Anpassung allerdings vorgenommen wurde, laufen diese voll automatisch und die gewonnenen Daten können ohne grossen Aufwand beispielsweise in einer Datenbank gespeichert und später statistisch ausgewertet werden. Einige der bestimmten Stammeigenschaften können aber auch für die Sortierung relevant sein.

Ein Beispiel für mögliche Informationen die aus dem Bild eines Stammquerschnittes extrahiert werden können ist in Abbildung 6 dargestellt. Mit den an der BFH gemachten Bildern, war es im Allgemeinen gut möglich die Markröhre der Stämme zu finden. Ausgehend von der Bestimmung dieses Stammzentrums, können relativ verlässlich Jahrringe detektiert werden, wodurch auch deren Anzahl und Breite als qualitätsrelevante Parameter berechnet werden können. Über die Bestimmung der Stammform können in weiterer Folge Eigenschaften des Stammes wie seine Rundheit und Exzentrizität (e. g. als schwacher Indikator für Druckholz) bestimmt werden.

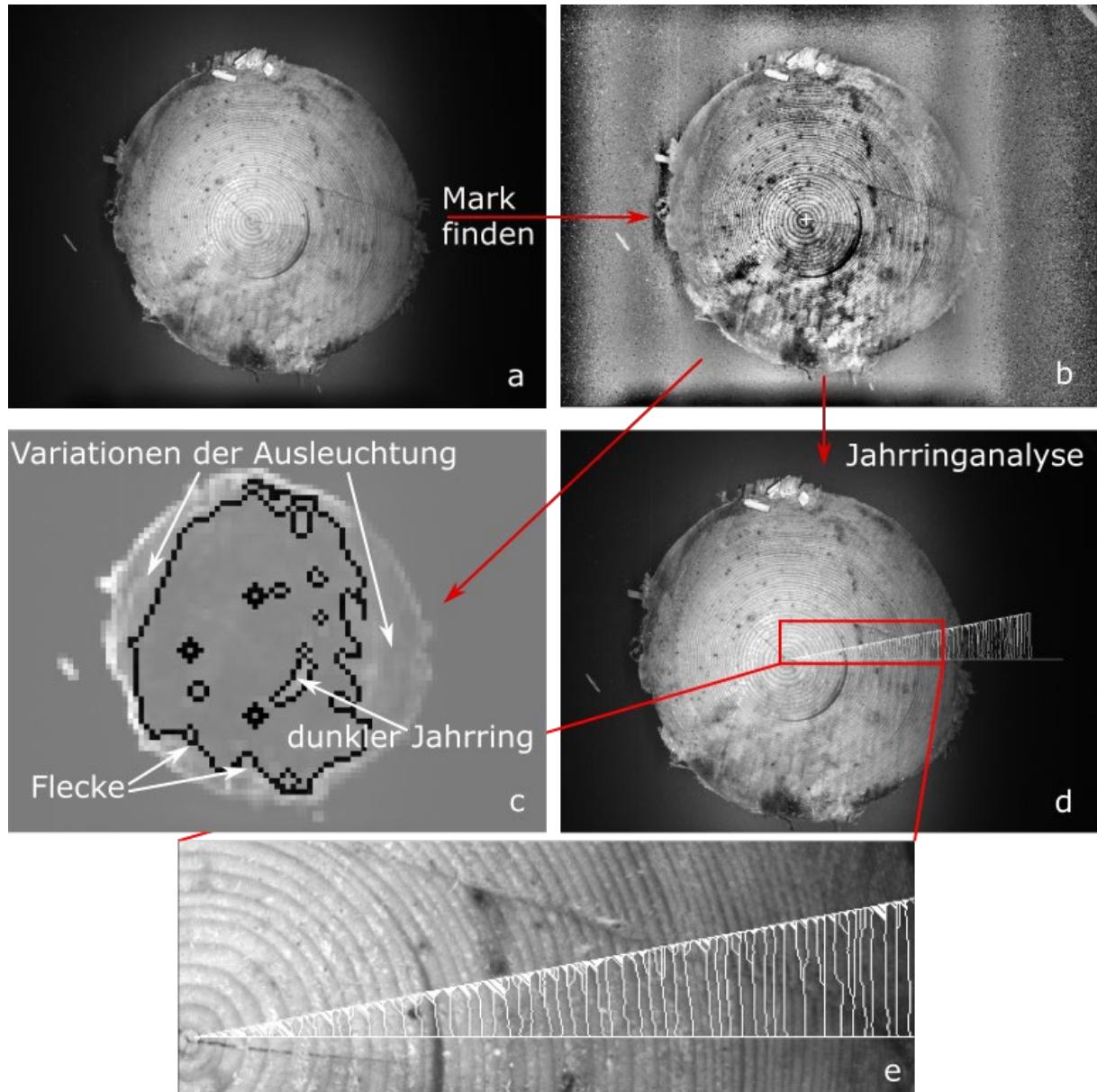


Abbildung 6: Beispiel der Ergebnisse einer Bildanalyse. a: Originalbild, ausgehend vom detektierten Mark (b), kann das Bild weiter in Bereiche unterteilt (c) und eine Analyse der Jahrringe durchgeführt werden. e: Detail aus d.

Es sind noch weitere Charakteristika denkbar, die im weiteren Verlauf des Projektes identifiziert werden sollten. Für eine robuste Funktionsweise der Algorithmen wird es notwendig sein, einen grösseren Satz Bilder vor Ort in aufzunehmen, so dass eine solide Parametrisierung erfolgen kann. Die derzeitige Implementierung ist in erster Linie als Machbarkeitsstudie zu verstehen. Es wurde wenig Wert auf die Rechengeschwindigkeit gelegt, wodurch die Algorithmen derzeit für eine Verwendung als in-line Tool eindeutig zu langsam sind. Es ist allerdings denkbar, dass mit einigen Optimierungen, zumindest ein Teil der Ergebnisse in Echtzeit während der Sortierung berechnet werden kann.

### 5.5 Schlussfolgerungen

Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen, dass das Vorhandensein von Harzgallen am Stammquerschnitt mit relativ geringem technologischen Aufwand erkannt werden kann. Es bedarf lediglich einer ausreichend starken und breitbandigen UV Quelle und einer Digitalkamera in einem abgedunkelten Bereich. Die Oberflächenqualität des Querschnittes spielt bei diesem Verfahren eine eher untergeordnete Rolle. Hier gilt es allerdings noch die Belichtungszeit zu reduzieren.

Mittels digitaler Bildverarbeitung kann eine Reihe von – teilweise qualitätsrelevanten – Merkmalen am Stammquerschnitt bestimmt werden. Die dazu notwendigen Algorithmen beinhalten zwar einige empirische Parameter die anhand eines Testsets auf die Art der zu verarbeitenden Bilder eingestellt werden müssen, laufen allerdings sonst voll automatisch. Für die Auswertung geeignete Bilder können dabei relativ einfach mit Industriekameras aufgenommen werden. Auch hier gilt es vertiefter zu untersuchen, inwiefern die verwendeten Methoden robust gegen Schwankungen im Erscheinen der Querschnittsoberflächen gestaltet werden können.

## 6 Probeaufnahmen Sägewerk

Während eines Tages wurden im Werk der Reinhardt Holz AG an der Sortierlinie knapp 600 Aufnahmen von Stammquerschnitten gemacht. Als Kamera kam die in Vorversuchen verwendete Cognex MicroVision (mit 9 mm Objektiv) zum Einsatz, zur Gewährleistung einer homogeneren Ausleuchtung wurde bei den Aufnahmen ein Blitz (Vivitar autothyristor 283) verwendet (Gesamtaufbau - siehe Abbildung 7). Das Triggern des Systems erfolgte über einen Infrarot Distanzsensor (SHARP 2Y0A02 F29) und einen Microcontroller (Arduino Pro Mini), der Kamera und Blitz simultan auslöste, sobald sich ein Objekt etwa 1 m vor dem Sensor befand. Alle Aufnahmen wurden kurz vor der Laservermessung (siehe Abbildung 8) an der dem Sortierer zugewandten Stirnseite durchgeführt. Die Aufnahmen wurden Anfang Juni am Vormittag an einem sonnigen Tag durchgeführt. Die Sortieranlage ist in einer weitestgehend offenen Halle untergebracht, wodurch das Licht im Raum von der Tageslichtsituation beeinflusst wird. Durch die Verwendung eines Blitzes sollten diese Schwankungen ausgeglichen werden. Die fotografierten Fichten- und Tannenstämme (*Picea abies* L., bzw. *Abies alba* Mill.) wurden in mehreren Ladungen per LKW angeliefert und direkt in die Sortieranlage entladen.



Abbildung 7: Setup Probeaufnahmen Sägewerk. Oben: Detail Kamera und blitz. Links unten: Gesamtaufbau fixiert am Gehäuse des Laserscanners. Rechts unten: Detail Kontrollbox.

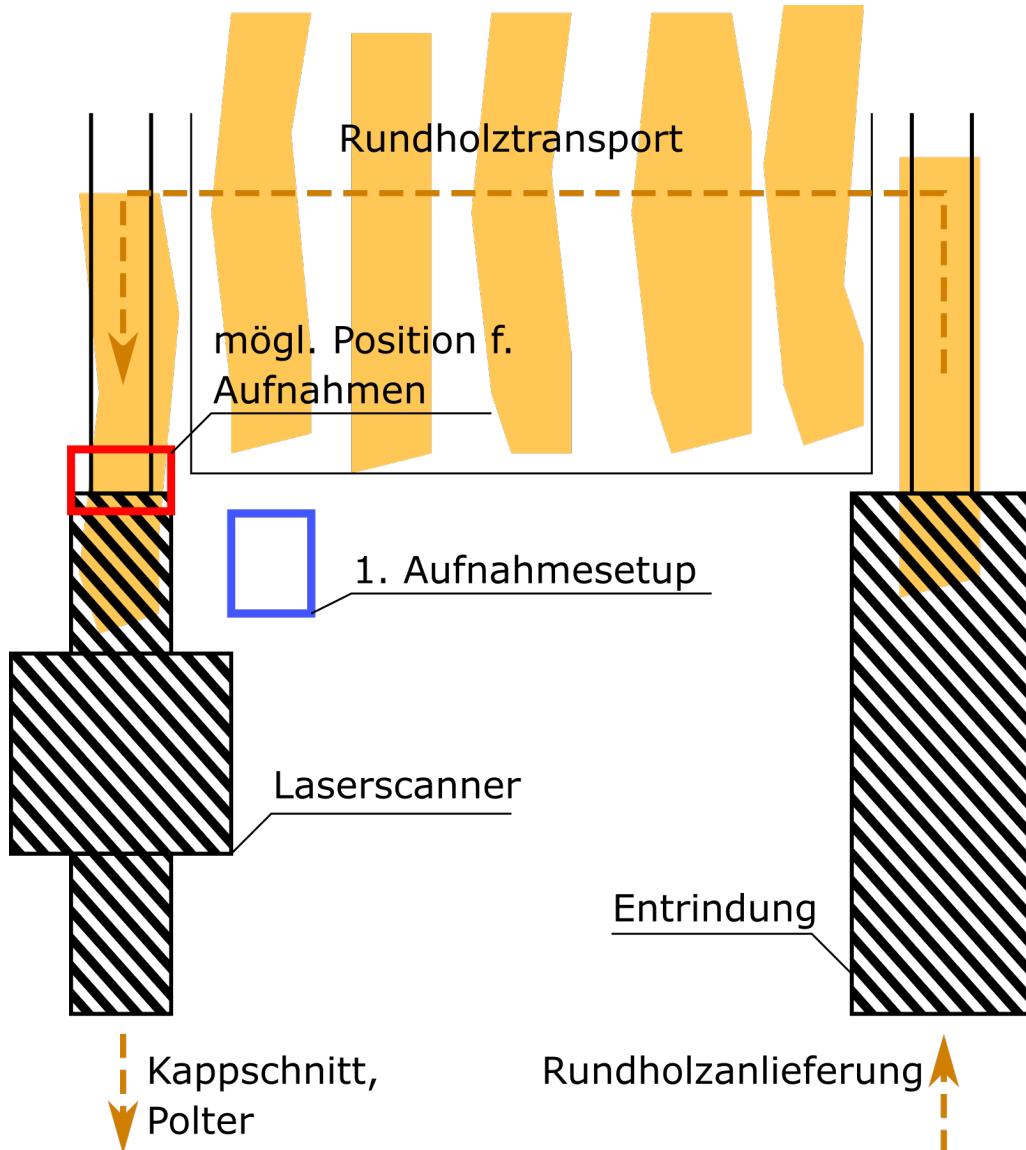


Abbildung 8: Schema des Weges von Stämmen bei der Rundholzsortierung. Blauer Kasten: Position Kamerasetup während der ersten Aufnahmeserie, rote Box: Vorschlag zum Anbringen von Kameras in Zukunft. Sortiererkabine befindet sich am Laserscannerausgang, neben der Kappanlage.

### 6.1 Qualitative Bewertung der Bilder

Grundsätzlich waren mit dem Aufbau zufriedenstellende Aufnahmen machbar. Es ist auffällig, dass es in einigen Fällen zu Fehlauslösungen kam, was wahrscheinlich auf die mangelnde Steifigkeit der gesamten Konstruktion zurückzuführen ist. Eine bessere Isolation gegen von der Förderlinie ausgehende Vibrationen und bessere Fixierung des Distanzsensors würden dessen Verrutschen deutlich reduzieren. Ein weiteres qualitatives Problem macht sich in einigen Fällen als Variation der Ausleuchtung bemerkbar. Diese Unterschiede sind primär auf unterschiedliche Abstände zwischen Aufnahmesetup und Stammende zurückzuführen. Der verwendete Blitz verfügt über eine automatische Intensitätsregelung, diese konnte die Differenzen aber nicht immer ausgleichen, wodurch es zu Unter- und Überbelichtungen kam. Die Abstandsvariationen sind – neben der natürlichen Stammdurchmesservariation – ebenfalls für die Schwankungen der Stammgrösse im Bild verantwortlich. Das vergleichsweise weitwinkelige Objektiv führt zu merklichen Skalierungseffekten. In einigen Fällen ist die gesamte Bildhöhe vom Stammquerschnitt ausgefüllt, was die Wahl der niedrigen Brennweite allerdings rechtfertigt. Höhere Brennweiten würden zwar die Skalierungseffekte reduzieren, allerdings ginge das mit Einbussen der Tiefenschärfe einher und die Kamera müsste in einem grösseren Abstand zu den Stämmen angebracht werden, was wiederum die Empfindlichkeit gegen Vibrationen noch zusätzlich verstärken würde.

## 6.2 Ergebnisse Bildanalyse

In allen Bildern wurde unabhängig von ihrer Qualität die Position der Markröhre von Hand bestimmt um als Referenzwert für die darauffolgende Auswertung zu dienen. Aus den Ergebnissen der Markröhrenbestimmung in Abbildung 9 ist ersichtlich, dass bei einem beträchtlichen Anteil der Bilder die Positionen falsch geschätzt wurden. Auch nach dem Aussortieren von Aufnahmen, auf denen kein Stamm zu sehen war und die deutlich überbelichtet waren, konnte die Quote verlässlich gefundener Zentren nur marginal gesteigert werden. Der Grund dafür ist zweierlei. Zum einen führen starke Verfärbungen durch Fäule, Schmutz oder Farbe dazu, dass Jahrringe in einem überwiegenden Teil des Querschnittes schlichtweg nicht sichtbar sind, wodurch eine Schätzung der Markröhrenposition unmöglich wird. Die zweite Schwierigkeit ist wieder Aufnahmetechnisch bedingt – primär aufgrund der Abstandsvariation kommt es in einigen Fällen zu unscharfen und/oder nicht ausreichend hoch aufgelösten Bildern in denen Jahrringorientierungen nicht bestimmt werden können.

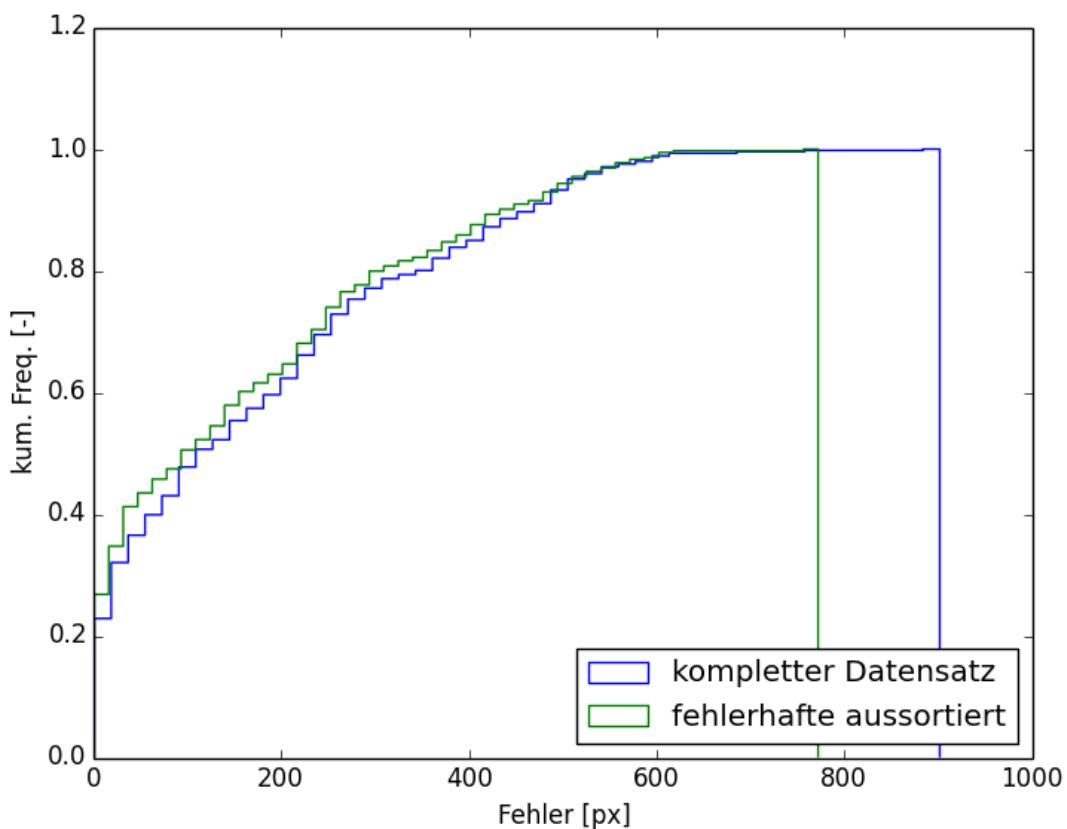


Abbildung 9: Fehler in Pixel bei der Bestimmung der Markröhrenposition und dazugehöriger kumulierter Anteil der analysierten Bilder.

In Abbildung 10 sind einige Beispieldaten mit unterschiedlich gut detekterter Markröhre dargestellt. (a) und (b) weisen – trotz gewisser Unschärfe und leichter Überbelichtung – ausreichend detaillierte Riss- und Jahrringstrukturen auf, wodurch die Markröhre bis auf wenige Pixel genau automatisch gefunden werden kann. In (c) konnte die Markröhre nicht gefunden werden, da die Jahrringe durch die Schnittqualität verschmiert und zusätzlich von der aufgesprühten Zahl überdeckt sind. Für (d) konnte ebenfalls keine zufriedenstellende Schätzung abgegeben werden, was wahrscheinlich auf die starken überlagerten Rissstrukturen zurückzuführen ist.

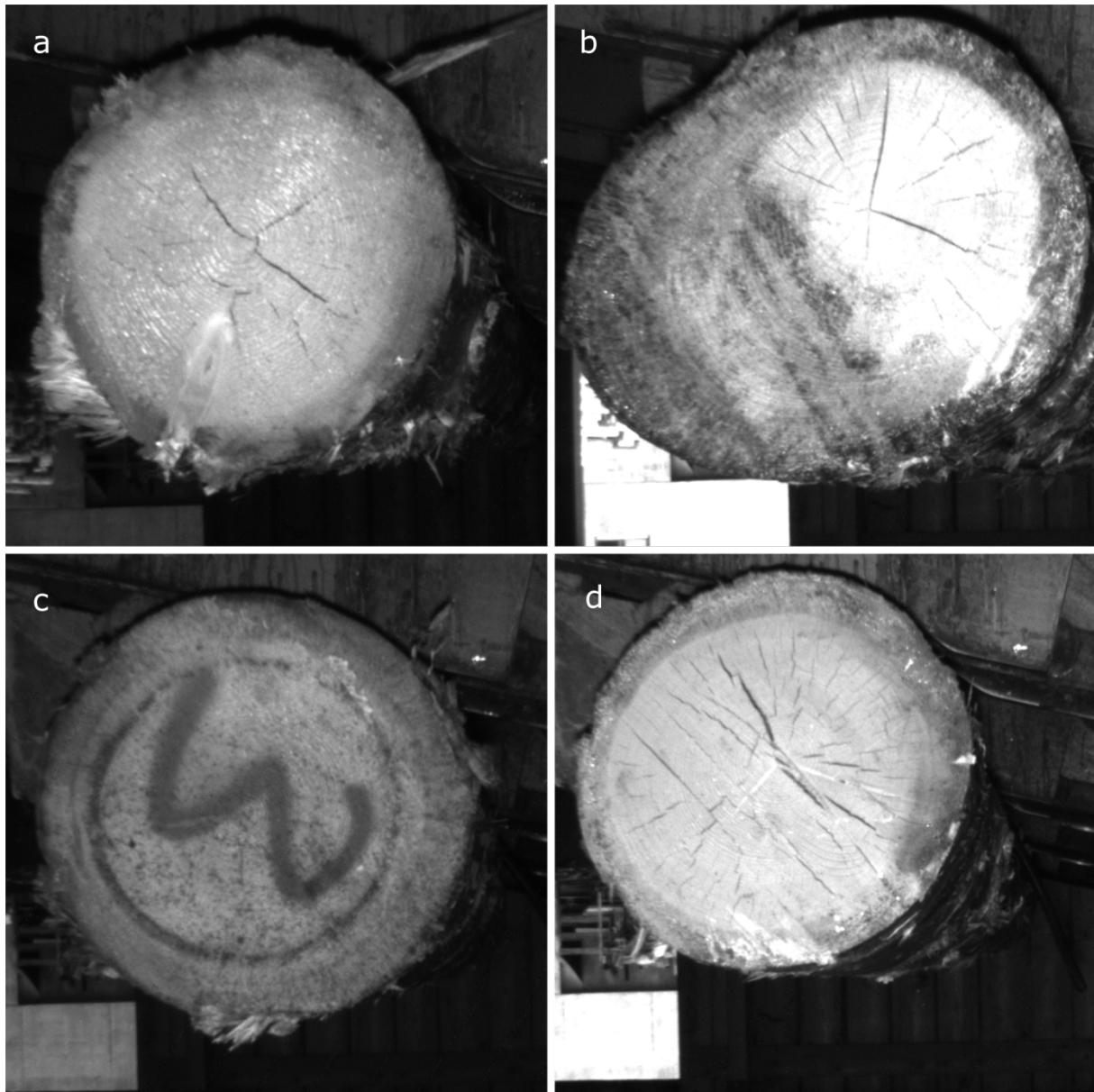


Abbildung 10: Beispielbilder aus den Sägerwerkaufnahmen auf denen die Markröhre unterschiedlich gut detektiert wurde. Fehler: a - 1 px, b - 3 px, c - 220 px, d - 495 px

### 6.3 Schlussfolgerungen

Die Probeaufnahmen haben gezeigt, dass für eine Bildanalyse geeignete Aufnahmen prinzipiell gemacht werden können. Es gab einige aufnahmetechnische Schwierigkeiten (bei 38% der Bilder), diese können mit einem steiferen Kamerasystem konstantem Abstand zum Stammende, beispielsweise mit genauerer Distanzmessung am Eingang zum Laserscanner (Abbildung 8, rotes Rechteck) gelöst werden. Die Verwendung eines Blitzes ist auf jeden Fall empfehlenswert, da somit Umgebungseinflüsse auf die Ausleuchtung minimiert werden können. Zusätzlich ist es einfacher, die grobe Position eines gut ausgeleuchteten Stammes gegen einen deutlich dunkleren Hintergrund zu finden. Störfaktoren wie Verschmutzungen, Verfärbungen, Aufschriften, die die Stammstruktur überdecken müssen hingenommen werden. Im konkreten Fall betrafen diese etwa ein Drittel der Aufnahmen, diese Zahl wird allerdings mit den einzelnen Holzlieferungen und der Lagerzeit variieren. Grundsätzlich bietet die hier vorgestellte Bildauswertung interessante Möglichkeiten zur Unterstützung der manuellen Sortierung. Selbst ohne besonderer Optimierung der Auswertesoftware, dauerte es im Mittel 0.47 s (+/- 0.24 s) um eine Schätzung für die Markröhrenposition als Basis für weitere Auswertungen zu erzeugen. Es ist anzunehmen, dass in der zu Verfügung stehenden Zeit von einigen Sekunden eine Reihe quantitativer Daten errechnet werden können.

## 7 Hyperspektrale Bilder

Die meisten in der vorliegenden Arbeit verwendeten digitalen Bilder sind Graustufenbilder, d. h. pro Pixel wird ein einziger Helligkeitswert gespeichert. Zusätzliche Information über die Farbe eines Objektes kann erhalten werden, indem man für jeden Pixel jeweils eine Intensität von rotem, grünem und blauem Licht aufnimmt. Technisch betrachtet, entspricht ein solches Bild einem dreidimensionalen Datensatz – Höhe und Breite entsprechen einer Position im Raum und die Tiefe entspricht einem Wellenlängenbereich. Aufgrund der erhöhten Dimensionalität des Datensatzes bezeichnet man die Datenpunkte oft als Voxel, anstatt Pixel. Löst man die Tiefe (Wellenlängen) des Bildes höher auf, spricht man - je nach Auflösung – von einem multi- oder hyperspektralen Bild. Solche Datensätze finden Einsatz in Bereichen von einigen Mikrometern in der Ramanmikrospektroskopie, bis hin zu Größenordnungen von Kilometern in der Fernerkundung. Die erweiterte spektrale Auflösung der Daten erlaubt im Allgemeinen eine bessere Zuweisung einzelner Bereiche und in manchen Fällen können auch Aussagen über die chemische Zusammensetzung der abgebildeten Objekte gemacht werden.

### 7.1 Bilddaufnahme

Aus zwei Fichtenstammabschnitten (ca. 35 cm Durchmesser) wurde in der Mitte jeweils ein 12 cm breiter Streifen herausgeschnitten. Die Querschnitte wurden anschliessen mit einer Oberfräse plangefräst und mit P80 Schleifpapier geschliffen. Die schlussendlich untersuchten Oberflächen sind in Abbildung 11 dargestellt. In einer Probe ist auf beiden Seiten der Mitte ein angeschnittener Ast klar zu erkennen. Die zweite Scheibe enthält stark ausgeprägtes Druckholz, eine gut sichtbare Harzgalle und am Rand ist Blaufäule zu erkennen.

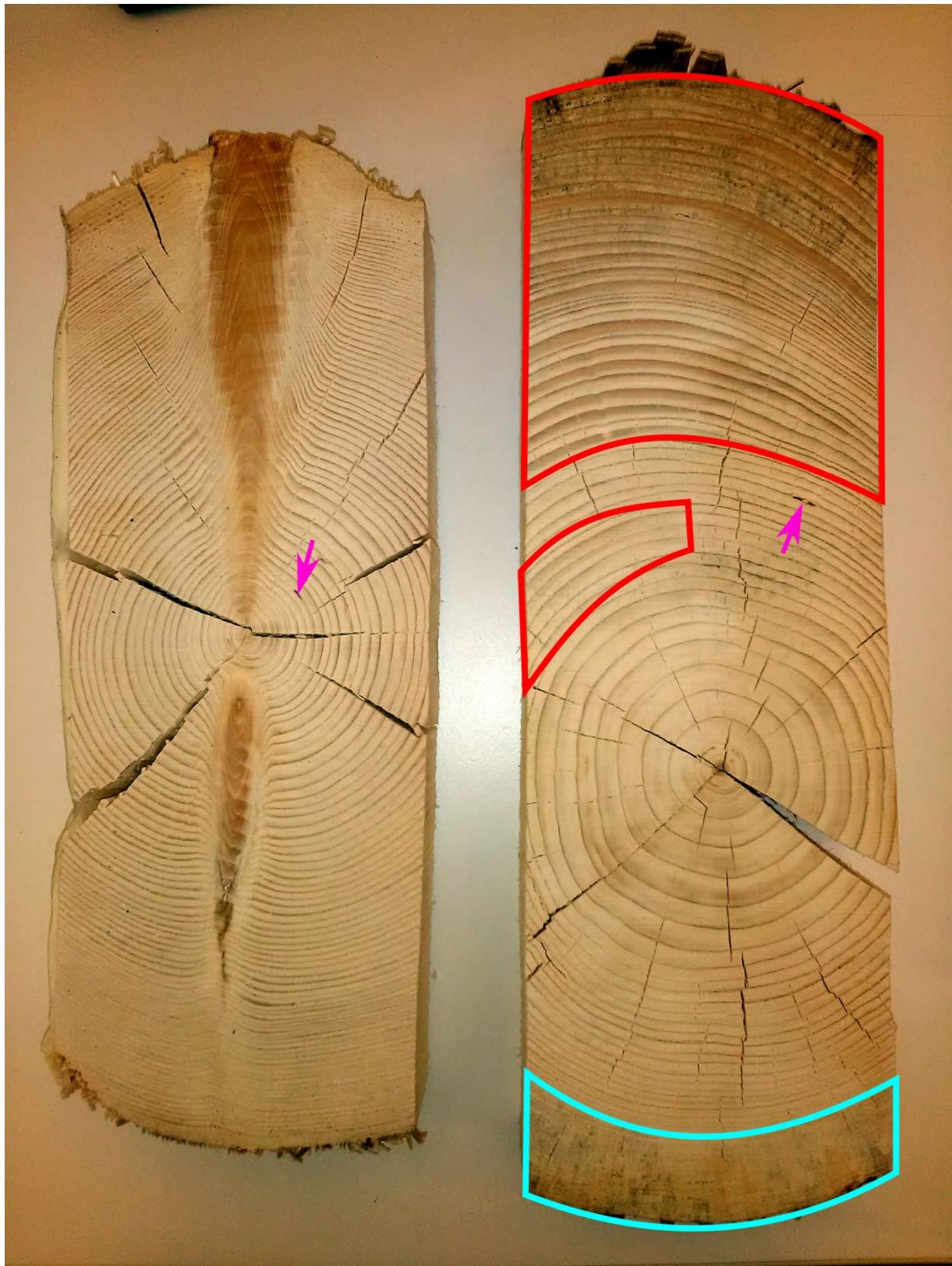


Abbildung 11: Probekörper für hyperspektrale Aufnahmen. Magenta Pfeile zeigen auf Harzgallen. Links: Querschnitt normales Holz, in der Mitte sind zwei vertikal verlaufende angeschnittene Äste erkennbar. Rechts: Querschnitt mit Druckholz (rote Einrahmung), zusätzlich ist im Cyan eingerahmten Bereich Blaufäule sichtbar.

Hyperspektrale Bilder wurden mit einem Linienscanner an der Uni Bern aufgenommen. Der Aufbau bestand aus einer über einem kontrolliert verfahrbaren Schlitten montierten Specim Hyperspektralkamera. Das Gerät deckt einen Wellenbereich von 400 – 1000 nm, mit einer Auflösung

von 0.8 nm ab, bei einer räumlichen Auflösung von ca. 38x38  $\mu\text{m}$  pro Pixel. Eine detaillierte Beschreibung des Gerätes und der Messmethode können in Grosjean et al. (2014) gefunden werden. Nach einer Aufnahmedauer von etwa 10 – 15 min wurde pro Probe ein Bild mit 1312 x ca. 5000 px und ein Datenvolumen von um die 5 GB produziert. Für die Auswertung wurden Algorithmen auf einem Standardlaptop in Python implementiert.

## 7.2 Manuelle Auswertung der Spektren

Aus einzelnen Pixeln in relevanten Bereichen der hyperspektralen Bilder wurden die dazugehörigen Spektren extrahiert. Aus den Spektren für Normalholz (Abbildung 12) sind im Allgemeinen höhere Intensitäten im roten Bereich (ab 700 nm) erkennbar, was mit dem farblichen Erscheinungsbild von Fichte übereinstimmt. Es besteht auch ein Unterschied zwischen Früh- und Spätholz, da ersteres grundsätzlich heller (i. e. höhere reflektierte Intensitäten) und einen höheren Anteil von vergleichsweise kurzwelligem Licht aufweist. Das entspricht ebenfalls den Erwartungen in Anbetracht der offensichtlichen Farbunterschiede zwischen den beiden Zonen. Auffällig ist, dass die Markröhre – sonst farblich eher dem Spätholz ähnlich – im sichtbaren Wellenlängenbereich Charakteristiken zwischen denen der Jahrringzonen und zusätzlich im nahinfraroten Bereich (NIR, über 900 nm) höhere Intensitäten aufweist. Sehr gut unterscheidbar von sind anhand der Spektren Harzgallen und Bläue. Zusätzlich dazu, dass beide Bereiche dunkler (i. e. allg. geringere Intensitäten) sind, sind im Harzgallenspektrum zwei Peaks bei etwa 850 nm und 950 nm erkennbar. Von Bläue befallene Bereiche zeichnen sich hingegen durch sehr flache, fast linear mit der Wellenlänge ansteigende Intensität aus.

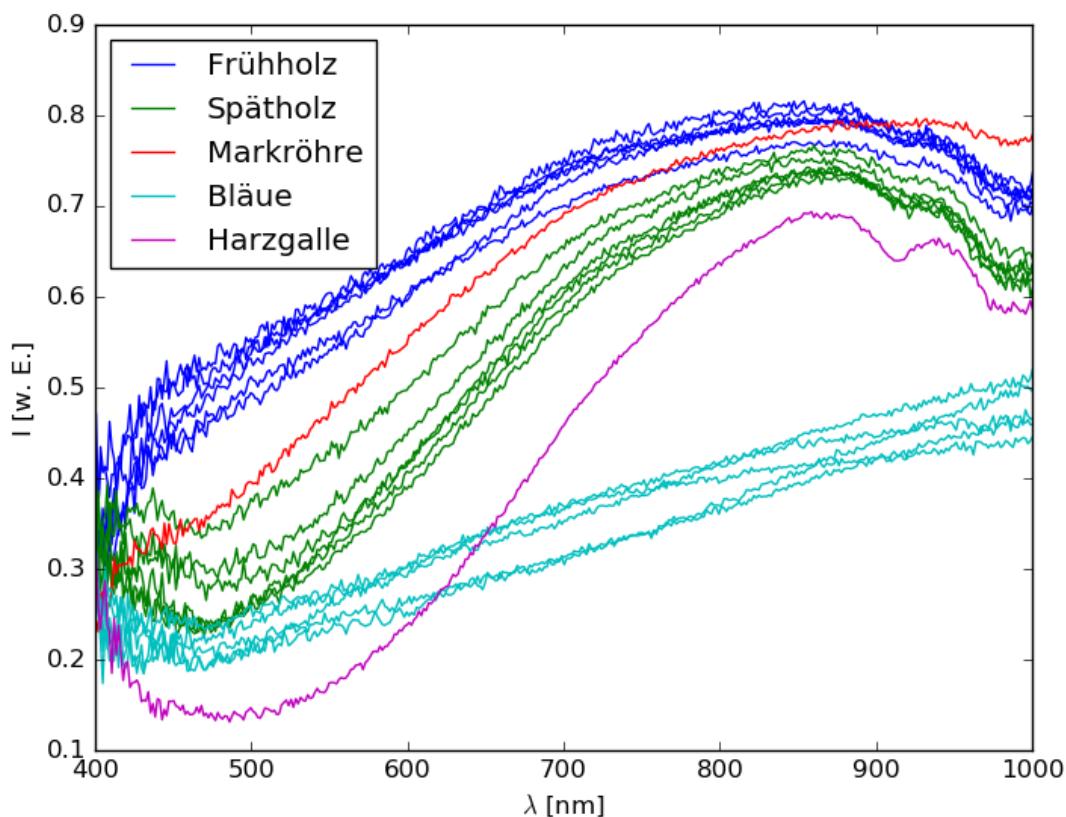


Abbildung 12: VIS-NIR Spektren aus einzelnen Bereichen der hyperspektralen Bilder. Spektren für Bläue stammen aus dem Druckholzquerschnitt, restliche aus Normalholz.

Bei einem Vergleich der Spektren der angeschnittenen Astansätze mit dem Rest des Querschnittes (Abbildung 13) ist die Unterscheidung zwischen den einzelnen Bereichen nicht mehr besonders gut möglich. Am Rand des angeschnittenen Astes entspricht die Farbe weitestgehend jener von Frühholz.

Die Astmitte hingegen scheint bei niedrigen Wellenlängen eher Spätholz und bei hohen eher Frühholz zu ähneln. Die Unterschiede sind allerdings gering und ob sie auf die Bereiche, oder auf den anderen Schnittwinkel im Ast zurückzuführen sind, kann dieser Stelle nicht gesagt werden.

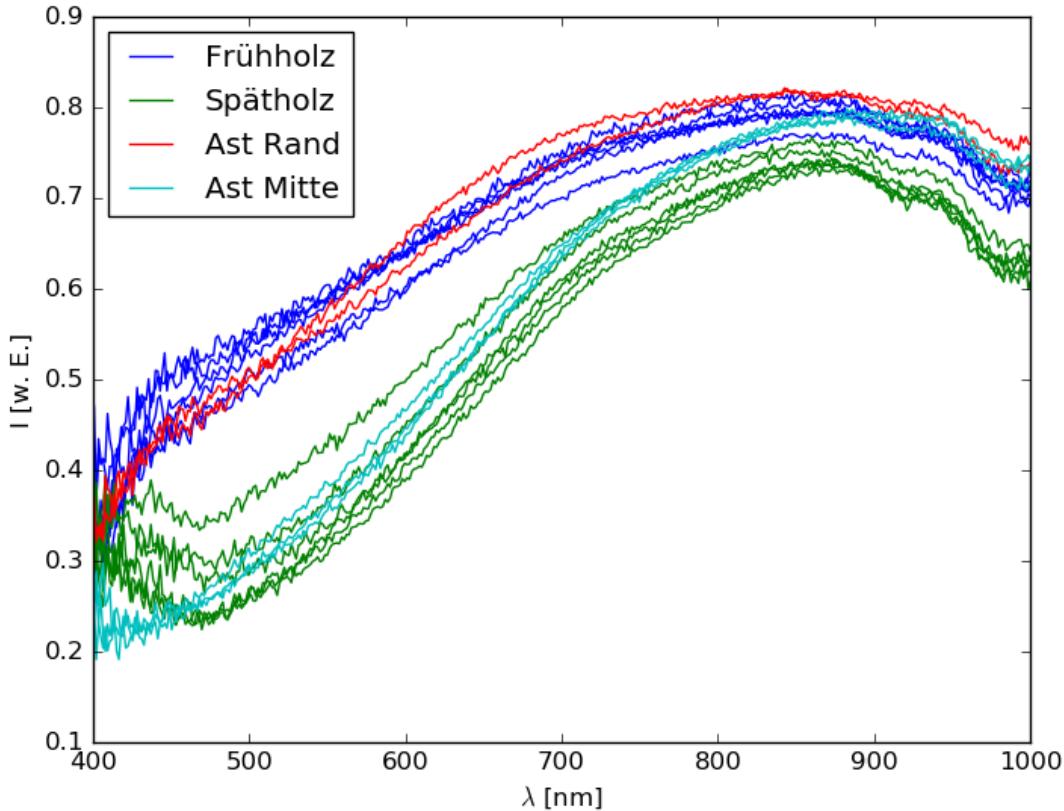


Abbildung 13: VIS-NIR Spektren von Normalholz. Vergleich von Früh- und Spätholz mit Bereichen aus angeschnittenen Astansätzen.

Schliesslich können in Abbildung 14 die Spektren von Früh- und Spätholz für Normales und für Druckholz verglichen werden. Im unteren Wellenlängenbereich sind keine Unterschiede zwischen den beiden Holztypen erkennbar. Bei höheren Wellenlängen hingegen, im roten und nahinfraroten Bereich weist Druckholz allgemein etwas höhere Intensitäten als normales Holz auf. Das Spätholzspektrum ähnelt dabei sehr stark dem Spektrum des zuvor beschriebenen angeschnittenen Astes (Mitte). Da es sich bei diesem Vergleich um zwei unterschiedliche Proben handelt, könnten die beobachteten Unterschiede auch auf Streuung zwischen den Beobachtungen zurückgeführt werden. Es ist allerdings aus der visuellen Beurteilung von Druckholz bekannt, dass dieses roter als normales Holz wirkt, was die hier gefundenen Unterschiede durchaus plausibel macht.

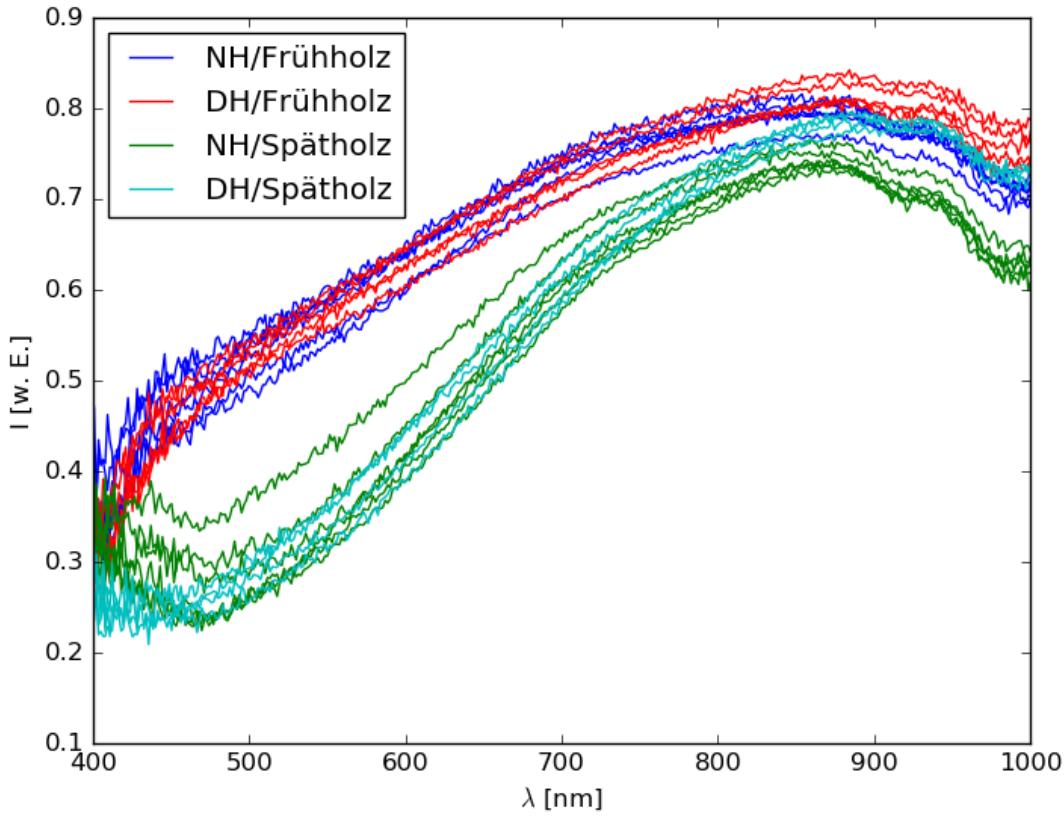


Abbildung 14: VIS-NIR Spektren von Früh- und Spätholz in normalem (NH) und Druckholz (DH).

Aus der Betrachtung der VIS-NIR Spektren aus manuell ausgewählten Bereichen ist ersichtlich, dass es Unterschiede zwischen diesen Bereichen gibt und diese prinzipiell auch quantifiziert werden können. Mit ausgedehnteren Messungen könnte eine ausreichende Basis für die Klassifizierung einzelner Pixel in einem hyperspektralen Stammbild geschaffen werden. Diese Methode würde allerdings einen beachtlichen Aufwand mit sich bringen und wäre auch in der Auswertung wahrscheinlich noch arbeitsaufwendig. In den folgenden Kapiteln wird auf Möglichkeiten weitestgehend unbeaufsichtigter Analysemethoden eingegangen.

### 7.3 Hauptkomponentenanalyse

Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, PCA) ist eine weit verbreitete Methode in der Analyse von beispielsweise Raman Mikrospektrogrammen. Diese Methode basiert darauf, das Eigenwertproblem der Autokorrelationsmatrix (der Intensitäten in jedem Pixel) des Datensatzes zu lösen. Die gefundenen Eigenvektoren stellen eine Orientierung in einem hochdimensionalen ( $d \gg 2$ ) Raum dar, der von den gemessenen Wellenlängen aufgespannt wird. Die jeweiligen Eigenwerte sind ein Mass dafür, wie gut eine bestimmte Hauptkomponente die untersuchten Daten beschreibt. Das Ergebnis der Analyse sind  $N$  ( $N=d$  für eine volle,  $N < d$  für eine dünn besetzte Analyse) zueinander orthogonale Hauptkomponenten von denen die ersten  $n$  ( $n < 10$ ) den Datensatz typischerweise sehr gut beschreiben (i. e. einen Grossteil der Streuung erklären). Es wichtig anzumerken, dass die von den Hauptkomponenten dargestellten Spektren per se keine physikalische Bedeutung haben, sondern lediglich die Daten beschreiben. Um physikalische Hauptkomponenten zu erhalten, ist eine Kalibrierung mit Spektren von Reinstoffen notwendig, die im konkreten Fall eine eingehendere Untersuchung erfordern würde, als der Projektrahmen es zulässt.

Da Hauptkomponenten in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls hochdimensional sind, ist eine Darstellung als Abbildung nicht realisierbar. Als Alternative bietet es sich an, den sog. hyperspektralen Winkel für jede (verwendete) Hauptkomponente anzugeben. Dieser wird – analog zum zweidimensionalen Raum – aus dem Arkuskosinus des Punktproduktes der betrachteten Hauptkomponente und des Spektrums in jeden Pixel berechnet. Dieser Winkel kann Werte zwischen 0°

und  $90^\circ$  annehmen. Ein kleiner Wert deutet auf ein Spektrum hin das der Hauptkomponente sehr ähnlich ist und die Ähnlichkeit nimmt mit zunehmenden Werten ab.

Aus der Hauptkomponentenanalyse an Normalholz hat sich gezeigt, dass die Beträge der Eigenwerte über die ersten drei stark abfallen und anschliessend abflachen (Abbildung 15, oben). Betrachtet man die zu diesen Eigenwerten gehörenden Hauptkomponenten (Abbildung 15, unten), ist ersichtlich, dass diese sich nicht in gut definierten Bereichen unterscheiden, sondern eher verrauscht wirken. In der vorliegenden Analyse wurden nur Wellenlängenbereiche zwischen 700 nm und 1000 nm untersucht, da dort in den Spektren die grössten Unterschiede und das geringste Rauschen beobachtet wurden. Das scheint allerdings nicht dazu beigetragen zu haben, gut definierte Hauptkomponenten zu finden.

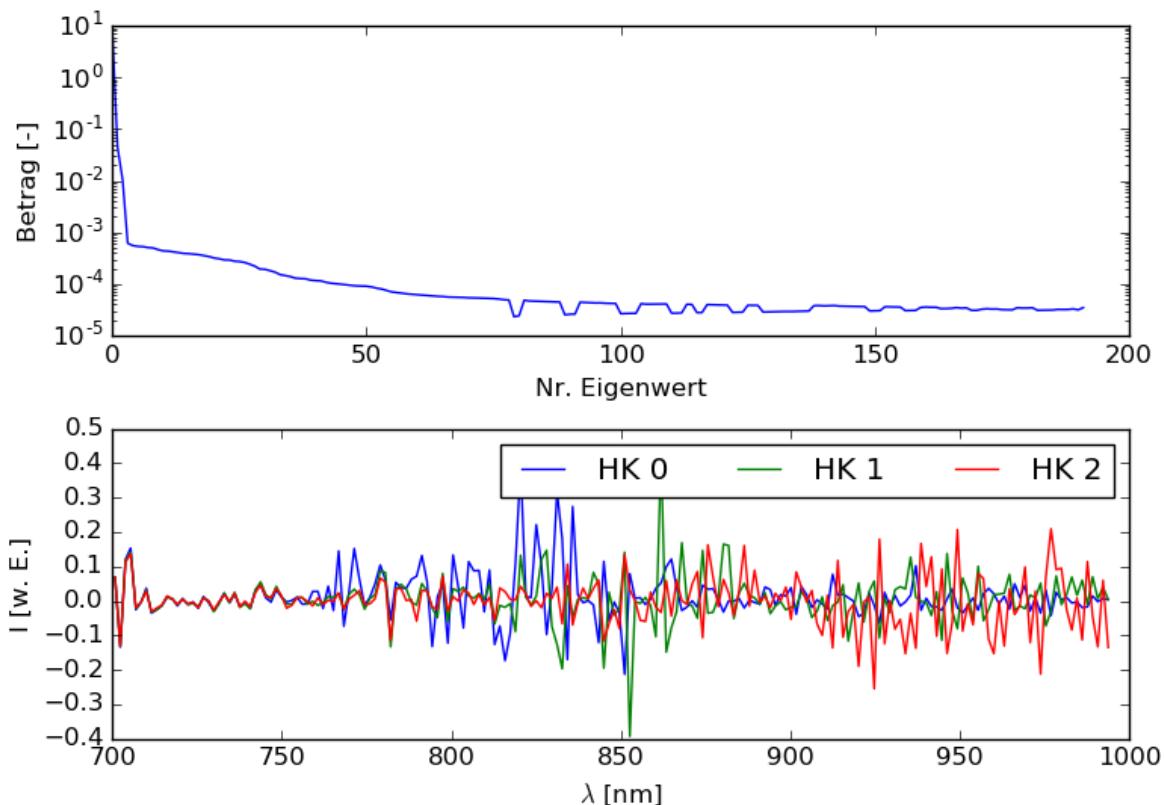


Abbildung 15: Hauptkomponentenanalyse Normalholz zwischen 700 nm und 1000 nm. Oben: Nach Grösse sortierte Eigenwerte der Autokorrelationsmatrix. Der anfängliche starke Abfall geht über die ersten drei Eigenwerte. Unten: Eigenvektoren der zu den grössten drei Eigenwerten gehörenden Hauptkomponenten.

Die Ähnlichkeit der Hauptkomponenten macht sich stark in der Darstellung der hyperspektralen Winkel in Abbildung 16 bemerkbar – es bestehen zwar leichte Unterschiede in der Helligkeit der Bilder, aber im Wesentlichen sehen sie gleich aus. Die einzigen gut erkennbaren Bereiche sind jene, die Bläue enthalten. Zwischen anderen Zonen, wie Früh- und Spätholz, etc. kann anhand der Ergebnisse nicht sinnvoll diskriminiert werden.

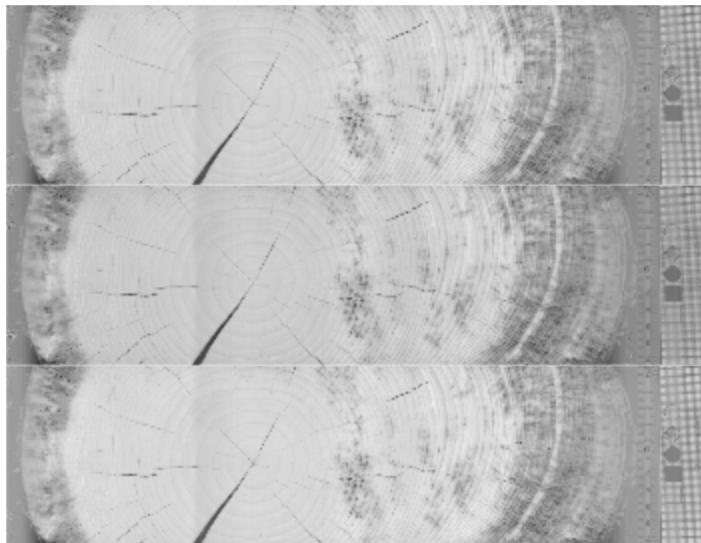


Abbildung 16: Darstellung der spektralen Winkel der Originaldaten zu den ersten drei gefundenen Hauptkomponenten.

Es scheint, dass Hauptkomponentenanalyse im gegebenen Fall keine gangbare Methode darstellt, um aus dem Datensatz Aussagen zu gewinnen. Das kann daran liegen, dass das Verfahren recht anfällig auf Rauschen in den Daten ist und im gegebenen Fall die einzelnen Bereiche nicht ausreichend unterschiedlich voneinander sind. Die Ergebnisse für Druckholz sind im Wesentlichen gleich zu jenen für Normalholz und auf diese wird nicht weiter eingegangen.

#### 7.4 Nichtnegative Matrixfaktorisierung

Nichtnegative Matrixfaktorisierung (Non-Negative Matrix Factorization, NMF oder NMF) basiert auf einer vergleichbaren Zerlegung des hyperspektralen Datensatzes, wie die Hauptkomponentenanalyse. Der Hauptunterschied ist – neben der Art der Berechnung – dass die erhaltenen Komponenten nicht orthogonal auf einander stehen. Das Ergebnis sind zwei Matrizen, von denen eine sog. Endmember (dt. auch Endglieder, keine sinnvolle Übersetzung vorhanden, vergleichbar zu Hauptkomponenten in vorhergehender Analyse) und die anderen Anteile jedes Endmembers in jedem analysierten Pixel enthält. Letztere Matrix kann ohne Umweg über Spektralwinkel als Bild dargestellt werden und visualisiert auf einfache Art die räumliche Verteilung der Endmember. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass die Lösung nicht unbedingt eindeutig ist (es können mehrere Faktorisierungen möglich sein), da die einzige Bedingung der Standardformulierung die Nichtnegativität der Faktormatrizen ist. Allerdings scheint die Methode weniger sensitiv auf Rauschen in den Daten zu reagieren (Keplinger 2017).

In der vorliegenden Arbeit wurde der von Wang et al. (2011) beschriebene Algorithmus implementiert. Es handelt sich um eine online Variante der nichtnegativen Matrixfaktorisierung, die es erlaubt, den zu analysierenden Datensatz stückweise zu laden. Dieser Umweg war aufgrund der Datenmengen (5-8 GB pro Bild) notwendig, und brachte gewisse Einbussen in der Verarbeitungszeit die ca. 7-8 min pro Bild betrug.

Die Endmember für Normal- und Druckholz sind in Abbildung 17, bzw. Abbildung 18 dargestellt. In beiden Fällen sind im niederwelligen Bereich starke Ausschläge zu sehen, was wahrscheinlich auf das starke Messrauschen in diesem Bereich zurückzuführen ist. Während einige Endmember nicht in Bezug zu den zuvor diskutierten Reinspektren zu stehen scheinen, sehen Endmember 4 bei Normalholz, sowie 0 und 2 bei Druckholz speziell im langwelligen Bereich den Jahrringspektren sehr ähnlich. Die folgende Analyse wird sich der Kompaktheit halber auf diese Endmember beschränken. Die anderen liefern ebenfalls interessante Ergebnisse, allerdings ist die Interpretation nicht trivial.

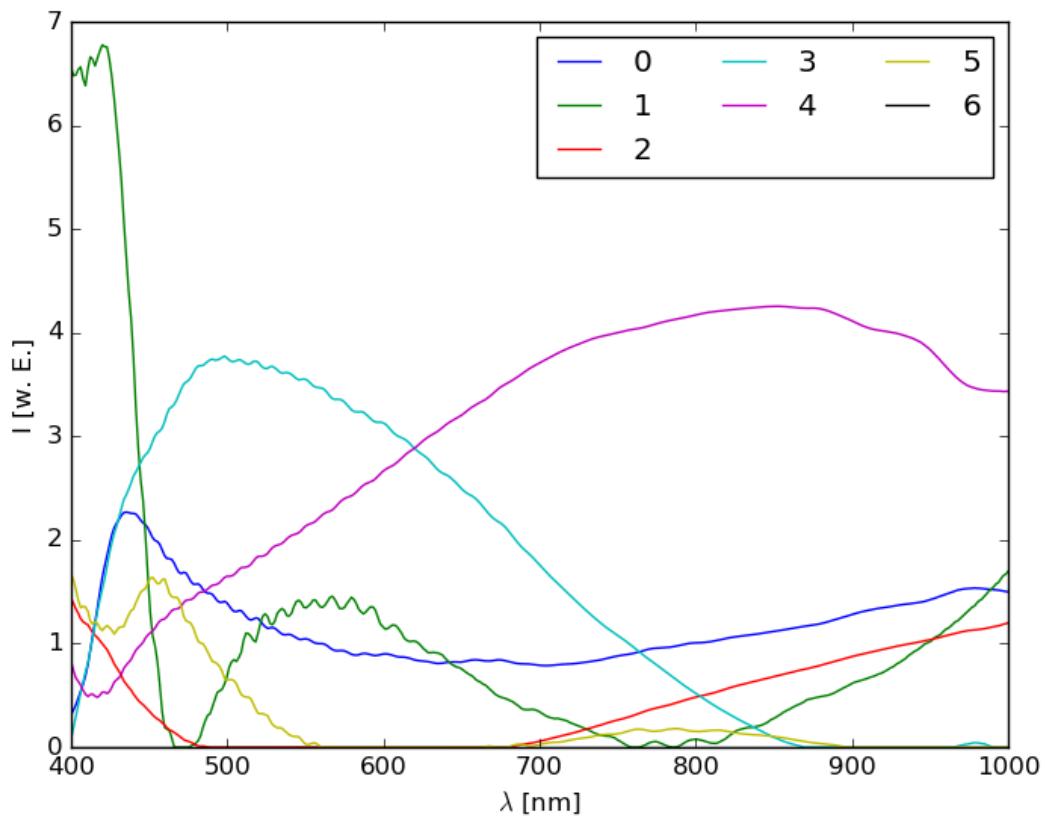


Abbildung 17: Endmember aus nichtnegativer Matrixfaktorisierung des hyperspektralen Bildes von Normalholz.

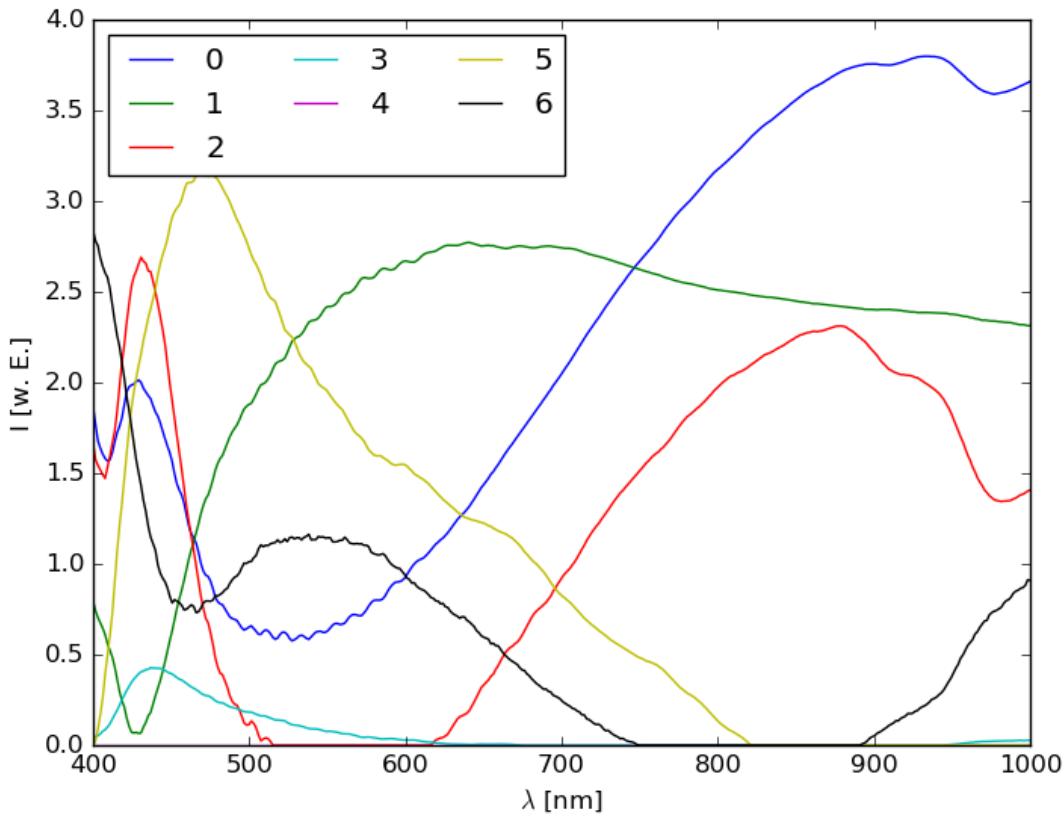
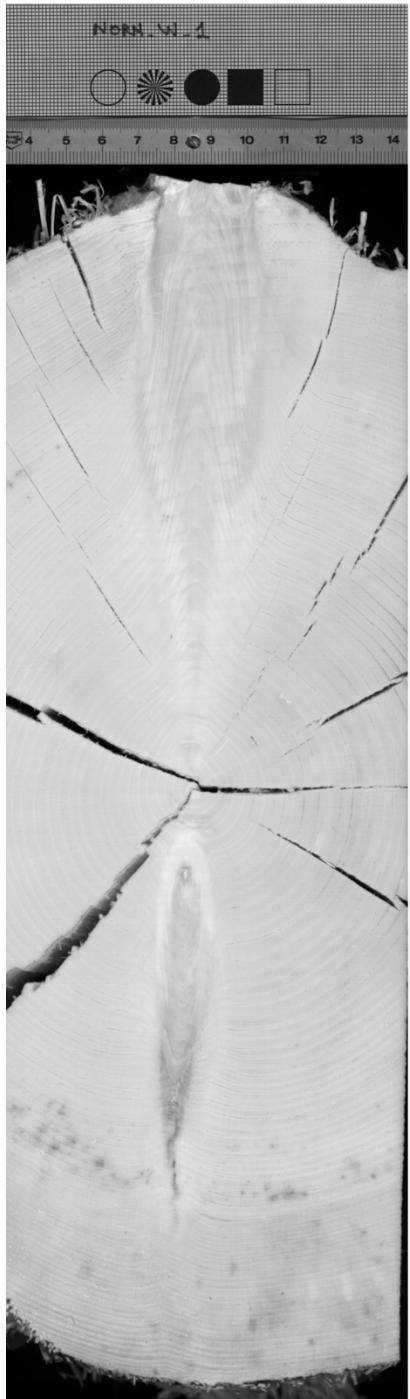


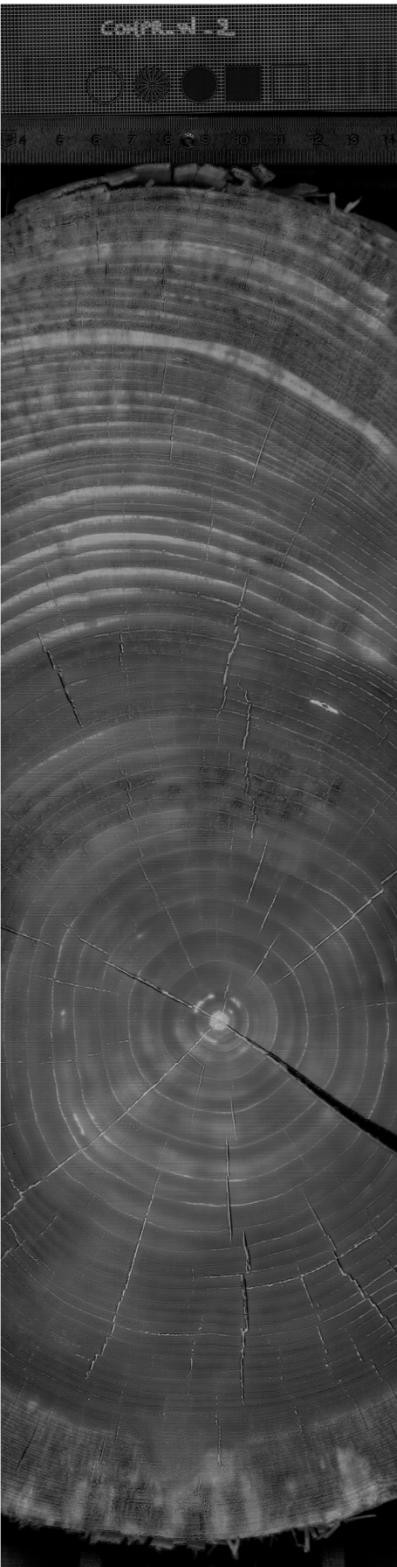
Abbildung 18: Endmember aus nichtnegativer Matrixfaktorisierung des hyperspektralen Bildes von Druckholz.

In Abbildung 19 sind die zu den besprochenen Endmembern gehörenden Anteile im ursprünglichen hyperspektralen Bild dargestellt. Bei normalem Holz beschreibt Endmememeber 4 den gesamten Stammquerschnitt sehr gut. Neben Rissen sind aber auch im unteren Bildabschnitt dunkle Bereiche im und neben dem Splint erkennbar. Bei genauerer Betrachtung der Probe hat sich herausgestellt, dass in diesen Bereichen anfängliche Blaufäule erkennbar ist, einige der dunklen Punkte entsprechen auch stark ausgeprägten Harzkanälen. Die interessanten Endmember des Druckholzes scheinen sich nur relativ wenig in ihrer Intensität zu unterscheiden, allerdings ergeben sich bei den Anteilsbildern beachtliche Unterschiede. Endmember 0 ist besonders in im Spätholz der Druckholzzonen ausgeprägt, zusätzlich auch in der Markröhre, in Harzgallen und es sind noch weitere Flecke am unteren Bildende erkennbar. Bei letzterer Region handelt es sich um bräunlich verfärbte Flecke im Splint, die auf eine anfängliche (Braun-)Fäule hindeuten könnten. Schliesslich scheint Endmember 2 in Bereichen der Druckholzscheibe ausgeprägt zu sein, die primär nicht von Fäule (Blau- oder sonst) betroffen sind. Stark ausgeprägte Druckholzbereiche scheinen die Anteile von Endmember 2 ebenfalls zu reduzieren.

NH/EM4



DH/EM0



DH/EM2



Abbildung 19: Anteile von Endmembebern, v. l. n. r.: Endmember 4, Normalholz; Endmember 0, Druckholz; Endmember 2, Druckholz

Die hier gezeigten Ergebnisse deuten darauf hin, dass nichtnegative Matrixfaktorisierung gut in der Lage ist, die hyperspektrale Aufnahme eines Stammquerschnittes in unterschiedliche Bereiche zu segmentieren. Die Interpretation der Bereiche und deren Zuteilung zu bestimmten Holzmerkmalen muss noch immer von einem Menschen vorgenommen werden. Es ist dennoch bemerkenswert, dass

diese Aufteilung lediglich auf hochauflöster Farbinformation basiert, ohne Annahmen über den Bildinhalt auskommt und auch robust gegen Objekte (e. g. Beschriftung auf Millimeterpapier in Abbildung 19, oben) ist die nicht zum Stammquerschnitt gehören.

## 7.5 Schlussfolgerungen

Für eine Implementierung in einer Sortierlinie ist die in diesem Kapitel beschriebene Methode eindeutig prohibitiv langsam und in vielerlei Hinsicht zu aufwendig. Sie birgt allerdings noch sehr viel Potential. Die hier verwendeten Auflösungen sind wahrscheinlich für eine Segmentierung der Bilder nicht erforderlich und könnten in allen Dimensionen reduziert werden. Zusätzlich können hyperspektrale Daten inzwischen auch (mit gewissen Umwegen und Einbussen) in Single-shot Modi, also ohne das zeitaufwendige Scanverfahren, erzeugt werden.

Geringere Auflösungen reduzieren auch sehr stark die Anforderungen an die Rechenzeit und – Leistung. Es muss an dieser Stelle auch erwähnt werden, dass die hier dargestellten Ergebnisse mit recht rudimentär implementierten Algorithmen erzeugt wurde – es wurde wenig Wert auf Geschwindigkeit gelegt und es wurden ausschließlich Spektren ausgewertet. Durch Ausnutzung räumlicher Korrelationen, Annahmen über das Bild und schlussendlich Optimierung des Quellcodes und geeigneter Hardware kann die Rechenzeit wahrscheinlich noch um Größenordnungen reduziert werden.

## 8 Testanlage UV Belichtung und Ausblick

Die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass Bilder unter Breitband UV Licht eine robuste Lösung bieten, um Harzgallen auf dem Stammquerschnitt hervorzuheben. Um dieses Verfahren in der Praxis zu untersuchen, wurde eine zusätzlich abgedunkelte Box am Ausgang des Laserscanners auf der Sortierlinie aufgebaut (siehe Abbildung 20). Als UV Quelle diente eine Black Gun UV Spot Lampe mit einer 400 W Omnilux Quecksilberdampflampe. Im Gegensatz zu Dioden bieten diese UV Quellen ein breites Spektrum und ermöglichen es auch, hohe Lichtleistungen zu erzeugen. Um Reflexe zu vermeiden, ist die Box im Innerem matt schwarz gefärbt. Die Aufnahme der Bilder erfolgt mit einer Farbindustriekamera (The Imaging Source DFK 41BF02.H), die über eine Infrarot Lichtschranke (Sick VL180-P132) getriggert wird. Kamerasteuerung, Bildanzeige und Datenspeicherung erfolgen über einen handelsüblichen Desktop PC.



Abbildung 20: An Laserscanner angeschlossener Testaufbau für Aufnahmen von Stammquerschnitten unter UV Beleuchtung.

Die Anlage wird für einen Monat vor Ort gelassen. In dieser Zeit kann der Aufbau eine Bilddatenbank für spätere Auswertungen liefern. Zusätzlich ermöglicht diese Testanlage auch wertvolle Erfahrungen des Sortierers zu sammeln. Mit diesem relativ einfachen Aufbau kann die Praxistauglichkeit des Konzeptes beurteilt werden, um später über eine fest verbaute Lösung zur Beobachtung beider Stammenden zu entscheiden.

## 9 Schlussfolgerungen

Es hat sich gezeigt, dass klassische Bildanalyse auf Stammquerschnitten ein hilfreiches Werkzeug für die Unterstützung der Rundholzsortierung darstellen kann. Es ist unabdingbar, dass die Querschnittsoberflächen eine gleichbleibende und relativ gute Qualität aufweisen. Die Oberflächenqualität auf dem Kappschnitt ab Wald ist grundsätzlich ausreichend gut, allerdings machen Spraymarkierungen, durch lange Lagerung entstehende Risse und Verfärbungen und andere Verschmutzungen Bildanalyse in vielen Fällen unmöglich. In der konkreten Situation hätte die Implementierung eines Vision System zu tiefgreifenden Veränderungen an der Sortierlinie geführt, die den Projektrahmen gesprengt hätten.

Die Auswertung hyperspektraler Bilder im VIS-NIR Bereich lieferte robuste Ergebnisse zur direkten Lokalisierung von Holzmerkmalen aus Farbnuancen. Im Gegensatz zu Bildanalyseverfahren basiert diese Methode nicht auf räumlichen Korrelationen (kann aber um diese erweitert werden), wodurch die gute Sichtbarkeit der Jahrringstruktur deutlich weniger Relevanz hat. Einer Implementierung stehen derzeit primär zeitliche Faktoren bei Aufnahme und Datenauswertung im Weg, die durch gezielte Optimierungen und Anpassungen auf Hard- und Softwareseite beseitigt werden können. Es wird angestrebt, dieses Verfahren in einem Folgeprojekt eingehender zu untersuchen.

Speziell zur Detektion von Harzgallen hat es sich als eine einfache Lösung herausgestellt, Bilder unter UV Licht aufzunehmen. Mit klassischer Bildanalyse sind Harzgallen aufgrund ihrer Form und Farbe äußerst kompliziert zu detektieren. Unter Breitband UV-Strahlung kann die vergleichsweise starke Fluoreszenz von Harz ausgenutzt werden, um Harzgallen gut sichtbar zu machen. Das Verfahren ist weitestgehend unsensibel gegenüber der Oberflächenqualität und lediglich anfällig auf andere stark fluoreszierende Substanzen (oft Markierungssprays). Diese Lösung wurde in Form einer Testanlage in der Sortierlinie implementiert und wird über das Projektende hinaus zum Aufbau einer Bilddatenbank für spätere Auswertungen genutzt.

## 10 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Es gilt das Geschäftsreglement des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung vom 23. 03. 2012.

### 10.1 Umfang des Berichts

Dieser Bericht besteht aus 34 Seiten inkl. Anhang.

## 11 Literaturverzeichnis

- Norell K (2010): „Automatic analysis of log end face images in the sawmill industry“, Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Schraml R (2016): “Log End Image Databases: Biometric Tracking & Image Analysis”, Magisterarbeit, Paris-London Universität Salzburg.
- Grosjean M, Amann B, Butz C, Rein B, Tylmann W (2014): "Hyperspectral imaging: a novel, non-destructive method for investigating subannual sediment structures and composition", Pages Magazine22 (1): 10-11
- Kepplinger (2017): mündliche Kommunikation, Juli 2017
- Legg M, Bradley S JFL (2016): „Measurement of the stiffness of standing trees and felled logs using acoustics: A review“, The journal of the Acoustical Society of America 139: 588-604
- Fedeli A, Pastorino M, Randazzo A, Poretti S, Monleone R, Salvadé A (2016): “Experimental analysis of dielectric structures with a two-step electromagnetic imaging method”, Conference Proceedings Electromagnetic Theory (EMTS).
- Inauen P, Moser M (2017): “Rundholzsortierung durch Bildverarbeitung an Stammenden”, Semesterarbeit, Berner Fachhochschule (BFH) Biel
- Koch M, Hunsche S, Schumacher P, Nuss MC, Feldmann J, Fromm J (1998): „THz-imaging: a new method for density mapping of wood“, Wood Science and Technology 32 (6): 421 - 427
- Sun Z, Bebis G, Miller R (2004): “On-road vehicle detection using optical sensors: a review”, Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transport Systems
- Su X, Tong H, Ji P(2014) : „Activity recognition with smartphone sensors”, Tsinghua Science and Technology 19 (3): 235 – 249
- Remondino F, El-Hakim S (2006): “Image-based 3d Modelling: A Review”, The Photogrammetric Record 21 (115): 269 – 291
- Brosnan T, Sun DW (2004): “improving quality inspection of food products by computer vision – a review”, Journal of Food Engineering 61 (1): 3 – 16
- Duc L, Seiler S (2018): “Detektion von Harzgallen mit UV-Strahlung”, Projektarbeit, Berner Fachhochschule (BFH) Biel
- Conner WS, Schowengerdt RA, Munro M, Hughes MK (1998): “Design of a computer vision based tree ring dating system”, 1998 IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation
- Schraml R (2017): mündl. Kommunikation
- Wang F, Tan C, Li P, König AC (2011): „Efficient Document Clustering via Online Nonnegative Matrix Factorizations“, Proceedings of the 2011 SIAM International Conference on Data Mining