

ARBEITSBERICHT

aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie

Nr. 2011/2

Entwicklung einer Software zur bildanalytischen Qualitätskontrolle von Holzfasern für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF)

Martin Ohlmeyer, Oliver Pieper, Benjamin Seppke,
Jörg Hasener

Entwicklung einer Software zur
bildanalytischen Qualitätskontrolle von Holzfasern für die
Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF)

Abschlussbericht

Universität Hamburg Zentrum Holzwirtschaft Leuschnerstraße 91 21031 Hamburg	Dr. Martin Ohlmeyer Oliver Pieper
mit den Kooperationspartnern:	
Universität Hamburg Arbeitsbereich KOGS Department Informatik Vogt-Kölln-Str. 30 22527 Hamburg	Benjamin Seppke
Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG Hannoversche Straße 58 31061 Alfeld	Dr. Jörg Hasener

Förderkennzeichen: 22020506

gefördert durch die
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage	1
2. Ziele	3
3. Aufgabenstellung	4
4. Stand der Technik	5
5. Ergebnisse: Projektteil A: Entwicklung einer Bildanalysesoftware zur Vermessung der Fasermorphologie und Größenverteilung von TMP zur Herstellung von MDF	9
5.1 Erarbeitung der Grundlagen für die Messung von Länge und Breite.....	9
5.1.1 Faserlänge.....	9
5.1.2 Faserbreite	11
5.1.3 Krümmung.....	11
5.1.4 Dichte	11
5.2 Optimierung der Bildqualität.....	12
5.2.1 Definition von Anforderungen zur Festlegung der Softwarestruktur.....	12
5.2.2 Ermittlung der Auflösung am Scanner.....	12
5.3 Optimierung der Bildakquise.....	13
5.3.1 Ermittlung der idealen Auflösung für die bildanalytischen Untersuchungen	13
5.3.2 Fasermengenbestimmung.....	14
5.3.3 Entwicklung und Anpassung von Algorithmen zur Formbeschreibung von Fasern	14
5.3.4 Vorverarbeitung zur Faseranalyse	15
5.3.5 Regionenbasierte Segmentierung der Fasern	16
5.3.6 Skelettbasierte Segmentierung der Fasern.....	17
5.3.7 Aktueller Stand der graphischen Benutzungsoberfläche (GUI).....	20
5.3.8 Mikroskopische Referenzmessungen von Fasermaterial.....	22
5.3.9 Versuchsreihe 1: manuelle Vergleichsmessungen	22
5.3.10 Versuchsreihe 2: manuelle Vergleichsmessungen	23
5.4 Parameteranpassung der Faseranalysesoftware	25
5.5 Generierung von Messdaten aus gewonnenem Probenmaterial.....	26
5.6 Vergleich der Software-Messungen mit manuell erstellten Mikroskopie-Messungen..	28
5.7 Einschätzung des Zeitbedarfs.....	31

6. Ergebnisse: Projektteil B Machbarkeitsstudie zur Bestimmung von geeigneten Bildakquise-Positionen im MDF-Prozess, vorrangig der vorverdichteten Fasermatte. Analyse der Machbarkeit von Merkmalsextraktionen der dort gewonnenen Bilder, mit der Zielsetzung das Potential einer Online-Shive-Erkennung zu erfassen.....	32
6.1 Generierung und Sichtung von Bildern aus verschiedenen Positionen des MDF-Prozesses	32
6.1.1 Faserbunker	32
6.1.2 Fasermatte	33
6.2 Bildakquise.....	33
6.3 Machbarkeitsanalyse zur industriellen Umsetzung einer Online-Shive-Erkennung	34
6.4 Merkmalsextraktion und Anwendung möglicher Segmentierungsverfahren.....	37
6.4.1 Bereitgestelltes Bildmaterial	38
6.4.2 Vorverarbeitung der Bilder.....	39
6.4.3 Merkmale für die Shive-Erkennung	43
7. Verwertung	45
7.1 Projektteil A.....	45
7.2 Projektteil B.....	45
Literaturverzeichnis	46
Tabellenverzeichnis.....	50

1. Ausgangslage

Die „Mitteldichte Holzfaserplatte“, die nach ihrer englischen Bezeichnung „Medium Density Fiberboard“ mit MDF abgekürzt wird, hat seit ihrer Erfindung eine immer stärkere Verbreitung gefunden. Der Holzfaserwerkstoff, dessen Dichte zwischen der von Schnittholz und jener von Faserplatten nach dem Nassverfahren liegt und daher mit dem Attribut mitteldicht bezeichnet wird, konnte in den vergangenen Jahren weltweit seinen Marktanteil steigern. Auf allen Kontinenten stiegen die Produktionskapazitäten von MDF konstant an, woraus sich auch eine weltweit hohe Nachfrage ableiten lässt. Am stärksten wuchs die Produktionskapazität in Ost-Europa und Asien, doch auch in Europa stieg jene Größe deutlich an. Nach Schätzungen der European Panel Federation (2007) wird die Produktionskapazität der europäischen MDF-Industrie zwischen 2003 und 2008 um über ein Fünftel steigen und beträgt 2008 geschätzt etwa 14,9 Mio. m³. Der jährliche Zuwachs von 2005 zu 2006 lag bei 8,8 %.

Die deutsche Holzwerkstoffindustrie ist bei der Produktion von MDF in Europa führend. Rund 4,2 Mio. m³ MDF wurden im Jahr 2006 in Deutschland hergestellt. Das entspricht rund einem Drittel der gesamten europäischen Produktion. Obwohl der Verbrauch von Spanplatten in Europa um ein Vielfaches über dem von MDF liegt, konnte jener deutlich homogenere Werkstoff kräftigere Zuwächse verzeichnen und seinen Anteil an den verwendeten Holzwerkstoffen kontinuierlich ausbauen (EPF 2007).

Bei der Herstellung von MDF spielen verschiedene Faktoren eine ausschlaggebende Rolle. Obwohl die einzelnen Fasern, aus denen eine Platte besteht, visuell nicht zu erfassen sind – im Gegensatz etwa zur OSB (Oriented Strand Board), deren Oberfläche durch ein charakteristisches Muster von verschiedenen großen Holzstrands gekennzeichnet ist –, hat auch bei diesem homogenen Werkstoff die Eigenschaft der einzelnen Fasern entscheidende Auswirkungen auf die Qualität des Produkts. Neben der Verarbeitung der Materialien spielt vor allem die Faserqualität eine wichtige Rolle: die Qualität der Fasern bestimmen die Güte der Platten. Darüber hinaus haben die Fasern, die in Europa hauptsächlich aus entrindetem Nadelholz gewonnen werden, einen enormen Einfluss auf die Produktionskosten einer MDF. Diesem Faktor allerdings wurde bei allen Versuchen, die Prozesse bei der MDF-Herstellung zu optimieren, bisher nur wenig Rechnung getragen. Der Verdichtungsprozess der Faserplatte zur Platte wird neben anderen Prozessparametern wie Temperatur, Feuchte, Schließzeit der Presse, Druck und Vorschubgeschwindigkeit der Platte maßgeblich durch die Partikelmorphologie beeinflusst. Zur Verbesserung sowohl der Plattenqualität als auch zur Erhöhung der Energie- und Rohstoffeffizienz ist eine präzise Bestimmung der Faserqualität entscheidend.

Bis heute gibt es keine präzise und allgemeingültige Definition dessen, was eine „gute“ Faser ausmacht. Ungeachtet der Tatsache, dass einzelne Fasern die Qualität des Endproduktes maßgeblich beeinflussen, wurden die morphologischen und mechanischen Eigenschaften der Einzelfaser in einer MDF bisher kaum untersucht. Während der Einfluss der Partikelgröße auf die Eigenschaften bei OSB und Spanplatten bereits seit langem bekannt sind (Deppe und Ernst 2000), wurden ähnliche Vergleichswerte für die Fasern einer MDF bisher nicht ermittelt. Damit sind die mechanischen Eigenschaften der Fasern und ihre Größenverteilung bisher für die laufende Produktion eine „Blackbox“. Denn während der Kenntnisstand über die chemischen Eigenschaften des Faserstoffs sowie über den Einfluss der Verarbeitungsmethode hoch ist, liegen bisher keine validen Daten über die Morphologie und Größenverteilung der einzelnen Fasern in einer MDF vor. Die bisher vorhandenen Möglichkeiten zur Faseranalyse, welche in Abschnitt 3.1 detailliert vorgestellt werden, reichen nicht aus, um die Beschaffenheit der Fasern zu erfassen. Die Qualitätskontrolle der Fasern und damit die Qualitätssicherung der Platten kann mit den gängigen Methoden noch nicht gewährleistet werden.

Die Entwicklung eines effektiven Instruments zur Qualitätskontrolle der einzelnen Faser ist aus verschiedenen Gründen wichtig. Eine Optimierung in diesem Abschnitt der Produktion einer Mitteldichten Holzfaserverplatte hat nicht nur Auswirkungen auf die Qualität des Endproduktes, sondern beeinflusst auch den Verbrauch von Energie und Ressourcen bei der Herstellung. Für die Produktion von MDF, müssen Holzhackschnitzel zerfasert, anschließend beleimt und letztlich zu Platten verpresst werden. Bei diesem Prozess ist der Arbeitsschritt der Zerfaserung von Holz, der energieintensivste Teil. Nachdem die Hackschnitzel gereinigt und in einem Kocher bei 100 °C gekocht wurden, werden sie in einem Refiner, in der Regel zwischen zwei Scheiben, von denen mindestens eine rotiert, zerfasert. Hierfür werden etwa 80 % der gesamten Prozessenergie beansprucht, die zur Herstellung einer Platte benötigt werden. Der Energieeinsatz ist verglichen mit der Spanplattenproduktion (circa 3800 MJ \ddot{A} q/m³) mit 8743 MJ \ddot{A} q/m³ etwa doppelt so hoch ((Frühwald et al. 2000)). Da die Qualität der Faser direkt mit dem Energieeinsatz korreliert, ist davon auszugehen, dass ein effizienter Energieeinsatz nur dann möglich ist, wenn ein möglichst genauer Kenntnisstand über die Eigenschaften der Fasern gegeben ist.

Neben jenem Potenzial zur Energieeinsparung beim Herstellungsprozess verspricht ein höherer Kenntnisstand über die Faserqualität auch eine Verbesserung der Eigenschaften des Endproduktes. So haben etwa Groom et al. (1999) nachgewiesen, dass sich bei einem erhöhten Feinanteil die Längenausdehnung der Faserplatte erhöht und gleichzeitig die Querkzugfestigkeit und der Biege-Elastizitätsmodul sinken.

Die Entwicklung einer präzisen Untersuchungsmethode zur Bestimmung der Faserqualität ist daher geboten, um ökologisch verantwortlich Ressourcen und Energie einzusetzen, die

Qualität zu verbessern und damit die Konkurrenzfähigkeit des Holzwerkstoffes MDF auch langfristig voranzutreiben und zu sichern.

2. Ziele

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer Software zur automatisierten Bestimmung der Größenverteilung von Fasern aus dem TMP-Prozess für die MDF-Produktion. Bei der thermo-mechanischen Methode der Zellstoffherstellung (thermo mechanical pulping, TMP) ist davon auszugehen, dass die Beschaffenheit der Faser beziehungsweise des Faserstoffs wesentlichen Einfluss auf die Effizienz der Produktion und auf die Qualität des Produktes hat.

In Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Informatik der Universität Hamburg, Arbeitsbereich kognitive Systeme und der Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG soll eine speziell für die optische Vermessung von MDF-Fasern ausgelegte Software entwickelt werden. Diese soll neben der Vermessung von Faserlängen und -breiten auch weitere Kenngrößen zur Beschreibung der Faserform beinhalten. Hierunter soll neben Krümmung auch Dichte fallen.

Des Weiteren wird eine Machbarkeitsanalyse zur industriellen Umsetzung einer prozess-integrierten Online-Fasermessung angestrebt. Hierfür werden verschiedene Möglichkeiten zur Bildakquise im MDF-Prozess, sowie die resultierenden Bildeigenschaften im Hinblick auf die Anforderungen an die Bildanalysesoftware überprüft.

Das Projekt setzt damit das Ziel, eine valide und für den industriellen Einsatz effektive Softwarelösung zu entwickeln, um die Qualität der Fasern zu untersuchen und zu kontrollieren. Die Messparameter sollen dabei den spezifischen Aufgabenstellungen bei der Untersuchung angepasst werden können.

3. Aufgabenstellung

Arbeitsziele a)

- I. Definition von Anforderungen an eine Bildanalytisesoftware um Grundlagen der Softwarestruktur festzulegen.
- II. Erarbeitung der Grundlagen für die Messung von Länge und Breite; unter Berücksichtigung der speziellen Anforderung von Fasern im MDF-Prozess (sehr kleine und sehr große Fasern).
- III. Entwicklung von Formparametern für eine reproduzierbare Beurteilung der Faser-morphologie (Krümmung, Knicke, Verdrehung).
- IV. Programmierung einer Bildanalytisesoftware zur hoch auflösenden und selektiven Vermessung von MDF-Fasern.

Arbeitsziele b)

- I. Generierung und Sichtung von Bildern aus verschiedenen Positionen des MDF-Prozesses.
- II. Merkmalsextraktion und Anwendung möglicher Segmentierungsverfahren.
- III. Bestimmung der Qualität verschiedener softwaretechnischer Verfahren und Algorithmen für die Erkennung von Grobanteilen (Shives) und auch kleineren Faserdimensionen.

4. Stand der Technik

MDF bestehen aus zerfasertem Holz. Diverse Faktoren beeinflussen die Beschaffenheit von MDF. Neben der Temperatur, dem Mahlscheibenabstand, der Beschaffenheit der Mahlscheiben und dem Druck beim Faseraufschluss, wirken sich auch das verwendete Holz oder die jeweilige Vorbehandlung der Fasern auf die Qualität des Endproduktes aus. So wurden von Gran und Bysted (1973) die Folgen der Dämpfung untersucht. Nachgewiesen wurde, dass sowohl die Temperatur als auch die Dauer des Dämpfungsvorgangs die Platteneigenschaften beeinflussen. Xing et al. (2008) belegten bei Ihren Untersuchungen mit „Atomic force microscopy“ den starken Einfluss des Druckes, beim Aufschluss im Refiner auf die mechanischen Vorschädigungen der einzelnen Fasern. Zusätzlich weisen Sie auf die Abhängigkeit der Morphologie der Holzfragmente in Abhängigkeit vom Druck im Refiner hin. Bei einem Druck von vier bar lagen bei Ihren Versuchen noch 68 % der gemessenen TMP-Partikel noch als Faserbündel vor.

Bei der thermo-mechanischen Zellstoffherstellung kommt eine thermische Vorbehandlung, das sogenannte „Pre-Heating“, zum Einsatz. Die Wirkung jener Erhitzung des Materials wurde von (Kehr) im Jahr 1977 erforscht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die Dauer und die gewählte Temperatur der Erhitzung den pH-Wert des Zellstoffs beeinflussen. Dass jener pH-Wert wiederum die Aushärtung des Phenol- und des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes beeinflusst, wurde von Nelson (1973) bewiesen.

Auch die Zerfaserungsmethode hat Auswirkungen auf die Beschaffenheit des Faserstoffs. Dies wurde bereits in mehreren Untersuchungen belegt. So wurde etwa der chemische Aufschluss des Holzes im Zerfaserungsprozess und dessen Auswirkungen auf die Qualität der MDF von Roffael et al. (1994, 1995) sowie von Buchholzer (1998) analysiert. Auch der Einfluss eingesetzter Chemikalien auf den Energieverbrauch beim Zerfaserungsvorgang ist erforscht. So konnten Roffael et al. (1994, 1995) und Schneider (1999) nachweisen, dass durch die Methode des „chemical thermo mechanical pulping“ (CTMP) die Menge der benötigten Energie bei der Herstellung einer MDF auch mit chemischen Mitteln beeinflussbar ist. Darüber hinaus hat die Zerfaserung Auswirkungen auf die Verklebung des Materials und die daraus resultierenden Eigenschaften, was von Nelson (1973) nachgewiesen werden konnte.

Die bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen über chemische und physikalische Zusammenhänge konnten in den vergangenen Jahren dazu beitragen, die Produktgüte der MDF zu erhöhen und die benötigte Energiemenge zu vermindern. Damit konnten entscheidende Fortschritte bei der Effizienz der Produktion und der Qualität der Produkte realisiert werden. Bisher weitgehend unerforscht ist hingegen der Einfluss der Partikelgröße auf die Eigenschaften der Platten. Bemerkenswert ist hierbei, dass sowohl bei den

grobspanigeren OSB als auch bei den feinspanigeren Spanplatten ein Einfluss der Partikelgröße auf die Eigenschaften seit langem bekannt ist Deppe und Ernst (2000). Es ist davon auszugehen, dass die Größe der einzelnen Späne sowie deren Verteilung auch bei einer mitteldichten Platte von entscheidender Bedeutung sind. Bisher findet keine prozessintegrierte Überprüfung der Grobanteile statt. Nur anhand von Vergleichen des Endproduktes mit Musterplatten kann am Endprodukt die Qualitätskontrolle durchgeführt werden. Die in diesem Projekt angestrebte Entwicklung einer Bildanalytischen Software soll diese Lücke in der Forschung schließen.

Bemerkenswert ist auch, dass die bisher vorhandenen Systeme, mit denen Geometrie und Abmessungen der Fasern analysiert werden können, keinerlei praktische Bedeutung in der industriellen Anwendung oder Forschung haben. So gibt es zwar Geräte, die zur Bestimmung der Qualität von Papierfasern eingesetzt werden, deren Übertragbarkeit auf die Analyse von Holzfasern ist aber, allein wegen des wesentlich breiteren Größenspektrums der Fasern, ausgeschlossen. Kuntzsch (2007) belegt die Problematik der beschränkten Auflösung von aktuellen Fasermessgeräten bei der Erfassung von Partikeln, deren Größe im Bereich von 10-20 µm liegen. Auch Fasern >7 mm liegen bei den Papiermessgeräten außerhalb des messbaren Bereichs. Dadurch sind neben der Möglichkeit die bei MDF häufig vorhandenen Shives (Grobanteile) zu messen, auch eine genaue Erfassung des stark Bindemittel verbrauchenden Feinanteils ausgeschlossen. Darüber hinaus ist jene Methodik, die etwa bei „Pulp-Quality-Mo“, „FiberLab“, „FiberTester“, „Fiber Quality Analyzer (FQA)“, Fibermaster oder „Pulpexpert“ eingesetzt wird, technisch sehr aufwändig und damit nicht wirtschaftlich für eine effektive Verwendung.

Die Geräte, die für eine Analyse von Papierfasern effektiv einsetzbar sind, sind jedoch für eine Analyse von Holzfasern nicht geeignet. Die ausgeklügelten Maschinen wurden zur Analyse eines beschränkten, für die Papierproduktion relevanten Fasergrößenspektrums entwickelt, größere Holzsplitter in der Fasermasse bei der MDF-Produktion hingegen würden die Geräte verstopfen und sind dementsprechend auch für die Software nicht zugänglich. Dennoch zeigen die erfolgreichen Ergebnisse der Messung der Fasermorphologie im Papierbereich, die Notwendigkeit, auch in der MDF-Herstellung ein funktionierendes Tool zur Bestimmung des Einflusses der Fasermorphologie anzuwenden. Auch die Siebanalyse, einer Methode, die mangels Alternativen aus der Spanplattenindustrie übernommen wurde, erweist sich als ungeeignet für die industrielle Praxis in der MDF-Herstellung. Die Analyse mit Luftstrahlsieben ist lediglich geeignet zur Grobabschätzung von Grob- und Feinanteil und ist daher keine geeignete Methode für die Optimierung der Faserqualität in der MDF-Herstellung. Das „QualScan“-System, das im Jahr 2002 entwickelt wurde, ist aus einem anderen Grund ebenfalls ungeeignet. In diesem Verfahren erfasst eine Hochgeschwindigkeitskamera mehrere tausend Fasern und wertet diese op-

tisch aus. Die untersuchten Fasern befinden sich bei dieser Methode in einem Mischtank und werden in einer Durchflusszelle untersucht. Da die Ergebnisse bei jener Analysetechnik nach eigenen Erfahrungen nicht reproduzierbar sind, ist auch der QualScan für eine valide Untersuchung der MDF-Fasern ungeeignet. Die Aussagekraft dieser Methode ist für die industrielle Praxis und die wissenschaftliche Arbeit nicht ausreichend, da sie nur eine Bildauflösung von höchstens 75 µm (in der Bildverarbeitung 150 µm) erreicht und damit für eine genaue Bestimmung der Feianteile einer MDF, deren kleinste Partikel unter 10 µm groß sind, vollkommen ungeeignet sind. Eine Veröffentlichung im MDF-Magazin (Lilie et al. 2006) stellt zwar die Summenhäufigkeiten für verschiedene Fasersortimente vor, die mit dem QualScan ermittelt wurden, die erkennbare Abstufung der unterschiedlichen Sortimente scheint nur durch die erhebliche Spreizung der Aufschlussbedingungen (8 .. 12 .. 16 bar) darstellbar zu sein. Es ist aber aus eigenen Versuchen und aus Erfahrungen von Industriepartnern bekannt, dass praxisnähere Variationen nicht mehr aufzulösen sind.

Es ist damit festzuhalten, dass die Industrie kein brauchbares Qualitätskontrollsystem für die Fasermorphologie zur Verfügung hat. Bisher prüfen die meisten MDF-Hersteller die Qualität der winzigen Fasern lediglich „manuell“. Mitarbeiter prüfen haptisch und optisch stichprobenartig eine kleine Menge Fasern mit den Händen. Diese Analyse nach Augenschein ist zur Optimierung der Prozessabläufe und der Qualität naturgemäß vollkommen unzureichend, da die Größenunterschiede im µm-Bereich nicht tastbar und die Erfahrungen der Mitarbeiter nicht wissenschaftlich darstellbar sind. Alternativ dazu werden die Oberflächen fertig produzierter MDF mit Mustern verglichen um individuell die Oberflächengüte abzuschätzen. Bei dieser Methode ist ein zeitnahes Eingreifen nicht möglich.

Alle derzeit am Markt erhältlichen Systeme konnten sich unter industriellen Produktionsbedingungen nicht hinreichend bewähren. Nach Bewertung des derzeitigen Stands der Wissenschaft sowie der auf dem Markt angebotenen Geräte ist daher zu konstatieren, dass ein Qualitätskontroll-System für MDF-Fasern bisher nicht vorhanden ist. Es bedarf daher der Entwicklung eines geeigneten Verfahrens, mit welchem die Faserqualität sowie der Einsatz von Klebstoff und Holz optimiert werden kann. Hierzu ist die Entwicklung einer exakt auf diese Anforderungen ausgelegten Software der erste Schritt.

Ein innovativer Ansatz zur Fasercharakterisierung wurde von der CUTEC, Clausthal, in Kooperation mit dem WKI, Braunschweig, im Rahmen des AiF-Vorhaben Nr. 12590 N erarbeitet (Benker et al. 2003). Mithilfe eines Laser-Scanners und Beugungsspektrometers können Fasern im luftgetragenen Zustand oder in wässriger Suspension vermessen werden. Aufgrund des Messprinzips kann eine Vermessung der tatsächlichen Größe der Fasern und deren Analyse nicht vorgenommen werden. Vielmehr beschränkt sich dieser Ansatz auf die Ermittlung von Kenngrößen nach dem „Fingerprint“-Prinzip. Es war zwar

möglich Online-Messungen im Faserstrom unmittelbar nach dem Refiner durchzuführen, die Ergebnisse erlauben allerdings nur eine Aussage über die Änderung der Betriebszustände. Eine echte Ermittlung der Faserlängen und -breiten sowie deren Auswertung konnten nicht erfolgen. Nach Aussagen der Projektverantwortlichen wäre dies nur mithilfe der Bildanalyse zu gewährleisten (Benker et al. 2003). Dieser Ansatz soll im Rahmen dieses Projektes „Fiber-Vision“ realisiert werden.

5. Ergebnisse: Projektteil A: Entwicklung einer Bildanalytischen Software zur Vermessung der Fasermorphologie und Größenverteilung von TMP zur Herstellung von MDF

5.1 Erarbeitung der Grundlagen für die Messung von Länge und Breite; unter Berücksichtigung der speziellen Anforderung von Fasern im MDF-Prozess

5.1.1 Faserlänge

Müssig et al. (2000) beschreiben die Faserlängen von Textilfasern unter messtechnischen Aspekten, welche von verschiedenen Erscheinungsformen der Fasern sowohl bei 3D-Betrachtung als auch bei 2D-Betrachtung vorliegen. Die differenzierte Betrachtungsweise ermittelbarer Längen lässt sich analog auf MDF-Fasern übertragen und erweitern. In Abbildung 5-1 sind beispielhaft mögliche Faserverläufe in verschiedener Ausprägung, wie sie auch bei MDF-Fasern vorkommen können, dargestellt.

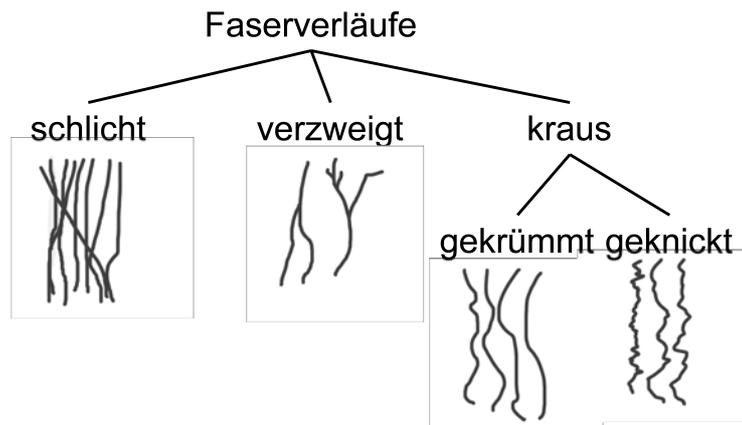


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung typischer Faserverläufe, abgewandelt nach Müssig (2000)

Die aufgezeigten Faserverläufe, können in der projizierten 2D-Darstellung auch kombiniert auftreten. Im Folgenden werden die Probleme bei einzelnen Längenbestimmungsmethoden aufgezeigt.

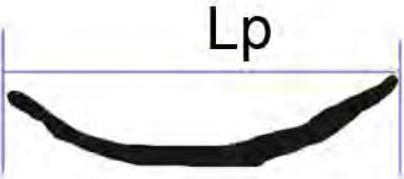
Modell	
Projizierte Länge oder Feret _{max}	
Rechteckmodell	
Skelettierte Mittellinie	

Abbildung 5-2: Längenmessmodelle zur Faserlängenbestimmung

- Feretdurchmesser: Die projizierte Länge zeigt die maximale Ausdehnung eines Objektes zwischen zwei parallelen Tangenten auf (ISO 13322-1 2004). Der Feretdurchmesser wird häufig bei runden, ovalen und anderen ähnlich flächigen Grundformen verwendet. Bei Fasern gestaltet sich, besonders durch die unterschiedlichen Krümmungsradien eine Verwendung dieses Längenparameters als schwierig. Auch einzelne Verzweigungen verzerren das Ergebnis.
- Rechteckmodell: Das Rechteckmodell, wie von Beck (1996) und Schmid et al. (2004) beschrieben wird für rechteckähnliche Formen in der Partikelmessung angewendet. Flock- oder Asbestfasern, Stroh und OSB-Strands haben selten Verzweigungen oder starke Krümmungen. Bei diesen Anwendungsfällen ist das Modell sehr realitätsnah. In der Bildanalyse wird es durch Messung von Rand- und Flächenpixeln angewandt. Sind Fläche und Umfang bestimmt, lässt sich durch eine quadratische Funktion ein Flächen- und Umfangsgleiches Rechteck errechnen, dessen größere Ausdehnung als Faserlänge angegeben wird (Gleichung 5-1). Da verzweigte Objekte flächen- und umfangsgleich zu geraden faserförmigen Projektionen sein können, werden durch die Anwendung dieses Modells Fehlmessungen verursacht.

Gleichung 5-1: Rechteckmodell nach Beck (1996)

$$A = l * b \quad \text{und} \quad U = 2l + 2b$$
$$\Rightarrow l = -\frac{U}{4} + \sqrt{\frac{U^2}{16} - A} \quad \Rightarrow b = \frac{A}{l}$$

- Skelettierte Mittellinie: Die skelettierte Mittellinie stellt nach dem Bildbearbeitungsvorgang des Skelettierens die übrig bleibende Mittellinie des Faserverlaufs dar. Krümmungen werden ebenso verfolgt wie Knicke. Die projizierte Faserform tritt in den Hintergrund. Wird das Rechteckmodell auf eine skelettierte Faser angewendet, entspricht die Länge des 1 Pixel breiten Rechtecks der Länge der gesamten Faser, sofern die Faser beim Skelettieren nicht mitgekürzt wird.

Um verlaufsunabhängige Messergebnisse zu erhalten, wird die Faserlänge innerhalb des laufenden Projektes anhand der skelettierten Mittellinie gemessen. Bei verzweigten Fasern wird der Hauptast über die Dicke definiert. Dieser wird als Faserlänge ausgegeben, während die Verzweigung als solche bestimmt wird.

5.1.2 Faserbreite

Die Faserbreite ist im Gegensatz zur Länge ein variables Maß, welches einer gewissen Verteilung unterliegt. So ist es durchaus denkbar, dass eine einzelne Holzfaser in der Abbildung in unterschiedlichen Abschnitten unterschiedliche Breiten aufweist. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wird die Faserbreite durch folgende statistische Merkmale bestimmt: minimale und maximale Breite, mittlere Breite und Standardabweichung.

5.1.3 Krümmung

Da die Krümmung einer einzelnen Faser ebenfalls sehr variabel sein kann, wird sie analog zur Faserbreite durch statistische Merkmale angegeben: minimale und maximale Krümmung, mittlere Krümmung und Standardabweichung. Die Krümmung wird durch aufspannende Winkel benachbarter Knoten des Faser-Skeletts bestimmt.

5.1.4 Dichte

Die Dichte wird analog zur Faserbreite und Faserkrümmung durch statistische Merkmale charakterisiert. Sie wird auf dem Faser-Skelett ermittelt. Hierbei wird der Umstand ausgenutzt, dass die Durchlichtaufnahmen kein Binärbild, sondern vielmehr ein Graustufenbild zurückliefern. Je dunkler eine Faser in diesem dargestellt ist, desto mehr Licht wurde verdeckt. Folglich existiert ein Zusammenhang zwischen Grauwert und Dichte der Faser. In

der Messung wird die Dichte jedoch nur unnormalisiert in Grauwerteinheiten ermittelt. Diese können bei Bedarf über die gesamte Faser gemittelt werden oder den maximalen Grauwert angeben.

5.2 Optimierung der Bildqualität

5.2.1 Definition von Anforderungen zur Festlegung der Softwarestruktur

Die grundlegende Softwarestruktur ist die Basis für dieses Projekt. Hierbei liegt das besondere Augenmerk auf einem modularen und anpassbaren Aufbau. Diese vergleichsweise einfach zu programmierenden Grundstrukturen wie das Management von Datenbanken traten im Vergleich zu den Bildanforderungen zu Beginn des Projektes in den Hintergrund.

Zur Abgrenzung der Software von anderen, auch am Markt vertretenen Produkten liegt der Schwerpunkt auf der Trennung von sich überkreuzenden Fasern auf dem digitalen Bild. Des Weiteren musste die ideale Streumenge für die Verwendung eines DIN A4-Flachbettscanners gefunden werden. Entscheidend war ebenfalls die Ermittlung der realen Auflösung des Scanners.

5.2.2 Ermittlung der Auflösung am Scanner

Die Hersteller von Scannern versprechen hohe Auflösungen von bis zu 9600 dpi. Hier ist zuerst zwischen der tatsächlich optischen Auflösung und der Interpolation der integrierten Software zu unterscheiden. Die durch die Hardware bereitgestellte Auflösung liegt bei handelsüblichen Flachbettscannern, welche im Durchlichtbetrieb arbeiten können bei maximal 4800 dpi. Das Vorhandensein von so vielen optischen Einheiten bedeutet jedoch nicht, dass die restlichen Scannermodule die entsprechende Bildqualität in digitaler Form weiterleiten können. Zur Überprüfung der tatsächlichen maximalen Auflösung wird ein USAF-1951 Test-Target verwendet (vgl. Abbildung 5-3), bei welchem jeweils drei parallele horizontale und vertikale Streifen in verschiedenen Größen eingescannt werden. Die kleinsten nach dem Scan einzeln mit bloßem Auge erkennbaren Striche, entsprechen der maximalen Auflösung und können durch Verwendung von Tabelle 5-1 umgerechnet werden.

Tabelle 5-1: Auflösung in DPI (<http://www.filmscanner.info/Aufloesung.html>)

Element	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
1	13	25	51	102	203	406	813	1626	3251	6502
2	14	29	57	114	228	456	912	1825	3649	7299
3	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8193
4	18	36	72	144	287	575	1149	2299	4598	9196
5	20	40	81	161	323	645	1290	2580	5161	10322
6	23	45	91	181	362	724	1448	2896	5793	11586

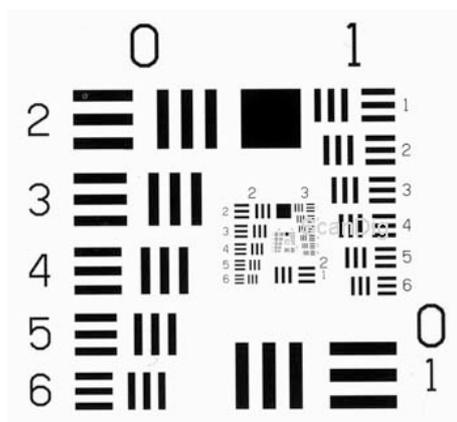


Abbildung 5-3: USAF-1951 Test-Target (Scandig)

Die tatsächliche optische Auflösung des verwendeten – mit 4800 dpi – ausgewiesenen Scanners (Epson Perfection V750 Pro) liegt bei 2300 dpi. Dennoch ist dieser geringe Wert vergleichsweise noch als qualitativ sehr hochwertig zu beurteilen.

5.3 Optimierung der Bildakquise

5.3.1 Ermittlung der idealen Auflösung für die bildanalytischen Untersuchungen

In Testscans mit verschiedenen Auflösungen, wurde die ideal anwendbare Auflösung als Kompromiss zwischen Bildgröße, extrahierbaren Details und Rechenzeit zur Bildbearbeitung gewählt. Da zur Erfassung einer größtmöglichen Fasermenge der Bildausschnitt die Maße von DIN-A4 abdecken sollte, musste die Auflösung zu diesem Zweck reduziert werden. Das gängige Microsoft Betriebssystem Windows XP Professional ist nicht in der Lage, Dateien die größer als 2 Gigabyte sind, zu verarbeiten. Ebenso reicht die Rechenleistung dafür bei einem PC mit 2 Gigabyte Arbeitsspeicher nicht aus. Nach verschiedenen Testscans unter Verwendung der in der Software Silverfast Ai Studio, Version 6.6.0r4v möglichen Scanparameter wurde als bestes Bildformat der Softwareeigene RAW-Modus HDR mit 16 bit Graustufen ermittelt. Der Raw-Modus schließt eine Scanner-

softwareeigene Vorverarbeitung der Bilder weitgehend aus. Hierdurch wird einerseits die Bildgröße stark erhöht, andererseits bleiben jedoch alle aufgenommenen Details erhalten. Im normalen Scanbetrieb werden durch integrierte Bildverbesserungsoptionen häufig schon Bilddaten verworfen, die für die Erkennung und Segmentierung von Fasern relevant sein könnten.

Die Bildqualität wurde durch Verwendung des TIFF-Formates unter Verwendung des verlustfreien Lempel-Ziv-Welch-Algorithmus (LZW) sichergestellt. Die Dateigröße einer TIFF-Bilddatei kann bei Verwendung dieses Algorithmus um ca. 50 % reduziert werden.

5.3.2 Fasermengenbestimmung

Zur Bestimmung der idealen Streumenge einer beliebigen Charge MDF-Fasern auf eine DIN A4-Glasplatte wurden Fasermengen von 0,5 g – 0,01 g abgewogen und über ein Sieb manuell gleichmäßig auf die Glaträgerplatte gestreut. Diese wurde mit einer zweiten, identischen Platte abgedeckt, um ein Verwehen der Fasern durch Luftbewegungen zu verhindern. Sowohl der Verlust von Fasermaterial als auch die reproduzierbare Bildgenerierung durch den Flachbettscanner (Epson V750 Pro) ohne Verschmutzung und Staubbelastung konnten hierdurch sichergestellt werden. Bei Versuchen mit der Software Fibreshape wurde eine ideale Streumenge bei ca. 2 % Flächenbedeckung festgestellt. Um einen Streumassenvergleich erstellen zu können, wurden verschiedene Scans mit unterschiedlicher Streudichte generiert.

5.3.3 Entwicklung und Anpassung von Algorithmen zur Formbeschreibung von Fasern

Für die Entwicklung der Software zur automatischen Bestimmung der Fasermorphologie sowie der Vermessung separierter Einzelfasern wurde zunächst eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass einerseits Informationen über die „Skelett-Eigenschaften“ einer aufgenommenen Faser interessant sind, wie zum Beispiel die Länge einer Faser oder diverse Krümmungseigenschaften. Andererseits stehen demgegenüber Regionseigenschaften, mit Hilfe derer komplementäre Eigenschaften wie zum Beispiel die mittlere Breite oder der Anteil an Fasermasse einer Faser bestimmt werden können. Zur Veranschaulichung dieser beiden Eigenschaften dient Abbildung 5-4.

□

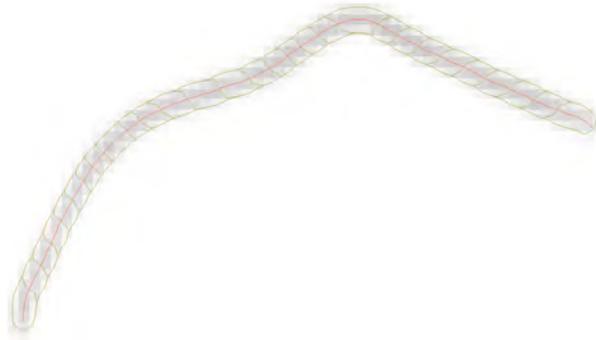


Abbildung 5-4: Segmentierung einer einzelnen Holzfaser. Gelb: Ergebnis der Subpixel-Wasserscheiden-Segmentierung, Rot: Berechnetes Subpixel-Skelett der Faser.

Wie bereits in den vorigen Abschnitten beschrieben, liegt die Aufnahmequalität des Flachbettscanners im Auflösungsgrenzbereich für die Fasermessung. Dies hat zur Folge dass eine einzelne Faser teilweise nur einen Pixel Breite aufweist und somit extrem instabile Abbildungseigenschaften auf dem Pixelgitter aufweist. Zur möglichst exakten Vermessung der Fasern und deren Morphologie werden deshalb Subpixel-genaue Ansätze gewählt, die auf einer Spline-Interpolation der Grauwerte des Bildes arbeiten. Eine gute Übersicht der verwendeten Subpixel-genaue Verfahren findet sich in Meine und Köthe (2006).

Die bisher implementierte Analyse von Fasern läuft in mehreren Schritten ab, daher werden diese in der Reihenfolge, in der sie im Segmentierungsvorgang auftreten, in den nun folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

5.3.4 Vorverarbeitung zur Faseranalyse

Zur Segmentierung der Fasermasse aus der Aufnahme wurde im ersten Ansatz ein einfaches Schwellwert-Verfahren gewählt. Dieses Verfahren bestimmt das Vorhandensein von Fasermasse in einem Pixel nach einer einfachen Fallunterscheidung. Liegt der Intensitätswert eines Pixels unter einer festzulegenden Schwelle, so wird der Pixel als zur Maske zugehörig markiert. Liegt er oberhalb oder auf der Schwelle, so wird er nicht markiert.

Diese Vorgehensweise lässt sich durch die Aufnahmetechnik begründen: Bei der Durchlichtaufnahme wird nur an den Stellen Licht absorbiert, an denen Fasermasse vorhanden ist. Mit der Schwelle wird folglich der Wert festgelegt, ab dem angenommen werden kann, dass Masse vorhanden ist und nicht etwa Störungen in den Abbildungseigenschaften des Scanners oder Staub vorliegen.

Nach dieser Vorverarbeitung werden für alle weiteren Schritte nur noch grob diejenigen Pixel betrachtet, die unterhalb des Schwellenwertes lagen. Dies führt zu einer Beschleunigung der nächsten Ausführungsschritte und macht es zudem möglich Zusammenhangskomponenten (Einzelfasern oder Faserüberlagerungen) in den weiteren Verfahrensschritten separat lokal zu behandeln (siehe Abbildung 5-5). Zurzeit ist diese Möglichkeit allerdings noch nicht umgesetzt.

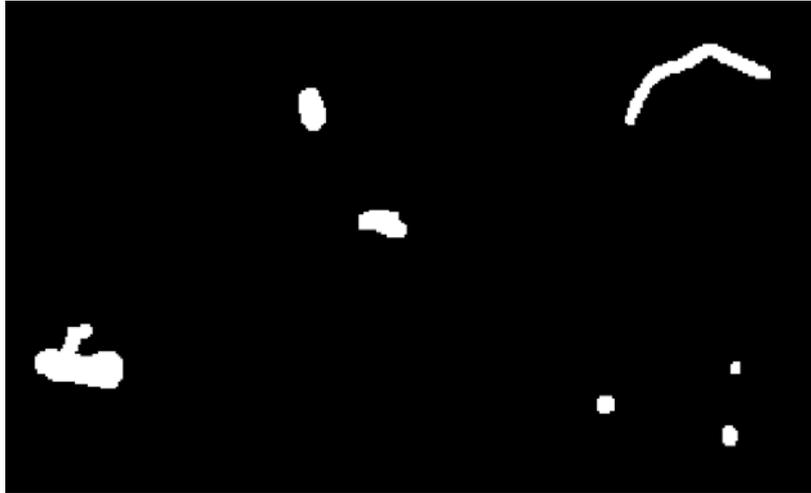


Abbildung 5-5: Nach dem Schwellwert-Verfahren lassen sich die einzelnen Zusammenhangskomponenten unabhängig voneinander untersuchen. In diesem Beispiel gibt es 7 Zusammenhangskomponenten.

5.3.5 Regionen basierte Segmentierung der Fasern

Um einige Fragen der Aufgabenstellung beantworten zu können, müssen Regionen basierte Merkmale der aufgenommenen Fasern ausgewertet werden. Zu diesem Zweck wird das Subpixel-Wasserscheiden-Verfahren (siehe Meine 2009) eingesetzt.

Dieses Verfahren soll zukünftig mit einer so genannten GeoMap¹ kombiniert eingesetzt werden. Da lediglich Teile dieses Algorithmus zur Erstellung einer solchen GeoMap als benutzbare Programmmodule vorliegen, wurde zunächst damit begonnen, die fehlenden Teile des Algorithmus in C++ zu implementieren. Da sich diese Arbeit als sehr langwierig abzeichnet, ist es derzeit noch nicht möglich, Eigenschaften der Regionen mit in die Faseranalyse bzw. Auswertung einzubeziehen. Daher wurde für die Vermessung der Breite und Dichteigenschaften auf andere Methoden zurückgegriffen.

Dennoch können die bereits vorhandenen Module der Subpixel-Wasserscheiden Segmentierung genutzt werden, um Regionsgrenzen zu erkennen. Dabei wird das Segmen-

¹ Eine GeoMap stellt eine besondere Form einer kombinatorischen Karte dar, die geometrische und topologische Informationen vereint und Operationen auf der repräsentierten Segmentierung ermöglicht, wie z.B. das Verschmelzen von Regionen (siehe Meine 2009).

tierungsverfahren auf das Gradientenbetragsbild angewendet, um so Kantenzüge als trennende Regionsgrenzen zu markieren.

Es muss an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass die Klasse der Wasserscheidenverfahren (auch die Subpixel-Variante) generell zu einer Übersegmentierung führen (siehe Abbildung 5-4). Diese Übersegmentierung ist aber im Allgemeinen nicht ungewollt, da in weiteren Verarbeitungsschritten die Regionen auf Grund verschiedenster Kriterien miteinander verschmolzen werden können. Dies ist in der Praxis sehr viel angenehmer zu handhaben als das nachträgliche Trennen von Regionen.

5.3.6 Skelettbasierte Segmentierung der Fasern

Wichtige Merkmale der Fasern lassen sich bereits durch ein „Faser-Skelett“ bestimmen, allerdings besteht nach der Vorverarbeitung noch ein weiteres Problem, bei dem die Skelett-Repräsentation helfen kann: Bedingt durch die Streuung der Fasern auf den Glasträger werden nicht alle Fasern vereinzelt. Somit gibt es häufig Überkreuzungen verschiedener Fasern, die die Messung nicht verfälschen sollen. Herkömmliche Systeme sind hierzu nicht in der Lage, und führen daher zu ungewünschten und inexakten Ergebnissen.

Das Skelett wurde mit Hilfe desselben Flusslinien-Algorithmus gewonnen, der auch für die Subpixel-Wasserscheiden-Segmentierung verwendet wird. Allerdings wird dieser zur Bestimmung der Skelett-Linien nicht auf das Gradienten-Betragsbild (Stärke der ersten Ableitung der Bildfunktion) sondern auf das Bild selbst angewendet. Dies führt zu dem Ergebnis, welches in Abbildung 5-6 links zu sehen ist: Es werden nicht die Kanten der Fasern verfolgt, sondern die Fasern selbst.

Leider folgt mit diesem Verfahren ein weiteres Problem: Die Skelett-Linien werden oft in der Länge unterschätzt, was in dem Such-Algorithmus der Flusslinien-Punkte begründet liegt. Wie in Abbildung 5-6 zu sehen, können diese Punkte wahllos innerhalb der abgebildeten Faser liegen, und nicht zwangsläufig in der Nähe des Randes.

Nimmt man nun noch die Regionsinformation hinzu, so ist es in den meisten Fällen möglich, diese offensichtlich zu kurzen Skelett-Linien wieder zu verlängern (siehe Abbildung 5-6 rechts). Dabei werden zusätzliche Endpunkte aus der Regionsrepräsentation (der Faserkontur) mit in das Verfahren einbezogen. Von diesen Endpunkten wird anschließend versucht, die Faser-Skelett-Linie zu vervollständigen. In Experimenten hat sich gezeigt, dass diese nachträgliche Korrektur der Faserlänge dazu führt, dass die korrigierten Messungen der tatsächliche Länge der Faser (z.B. manuell per Mikroskop gemessen) wesentlich besser entsprechen. So wurde die Faser Abbildung 5-6 ohne Korrektur mit einer Länge von 55,01 μm vermessen, nach der Korrektur beträgt die gemessene Länge 182,44 μm . Manuell durchgeführte mikroskopische Messungen führten zu einer Länge von 193,78 μm .

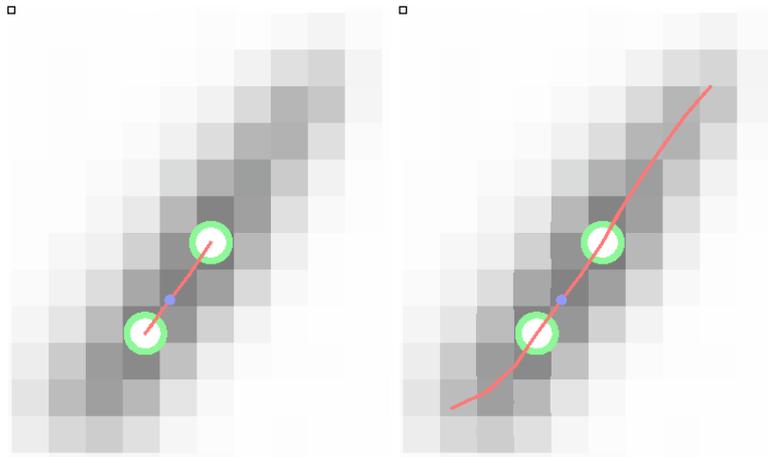


Abbildung 5-6: Links: Durch das Subpixel-Skelett können die Skelett-Linien hinsichtlich ihrer Länge unterschätzt werden. Rechts: Korrektur der Länge durch Regionsinformationen über das Faserende.

Anschließend werden ausgehend von den Skelett-Linien Kreuzungshypothesen aufgestellt. Diese Kreuzungshypothesen werden für jeden Knoten des Faser-Skeletts aufgestellt, der mehr als zwei Nachbarn besitzt.

Der Algorithmus der Hypothesenerstellung arbeitet wie folgt:

1. Berechne die Winkel paarweise für alle Nachbarn um den entsprechenden Knoten, den diese mit dem Knoten bilden.
2. Bestimme das noch nicht markierte Paar, dessen Winkel am nächsten an 180° liegt (die wahrscheinlichste Hypothese).
 - a. Liegt der Winkel nahe genug an 180° , dann markiere die beiden Knoten als verbunden und gehe zurück zu Schritt 2.
 - b. Sonst beende den Algorithmus

Ein beispielhaftes Ergebnis der Hypothesen ist in Abbildung 5-7 gezeigt. Der nächste Schritt, die Vermessung von Einzelfasern-Eigenschaften würde nun ausgehend von diesen Hypothesen sich überkreuzende Fasern getrennt behandeln und somit korrekte Messergebnisse ermöglichen.

Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass diese Hypothese nur für Kreuzungen sinnvoll erscheint, da es dort recht klar separierte Hypothesen gibt. Für den Umgang mit Aufspaltungen muss in Zukunft sicher eine umfangreichere Analyse der benachbarten Knoten folgen, da es dort wenig sinnvoll erscheint, die Faser zu dem am besten passenden Ast zu verlängern und die anderen Äste als getrennte Fasern zu behandeln.

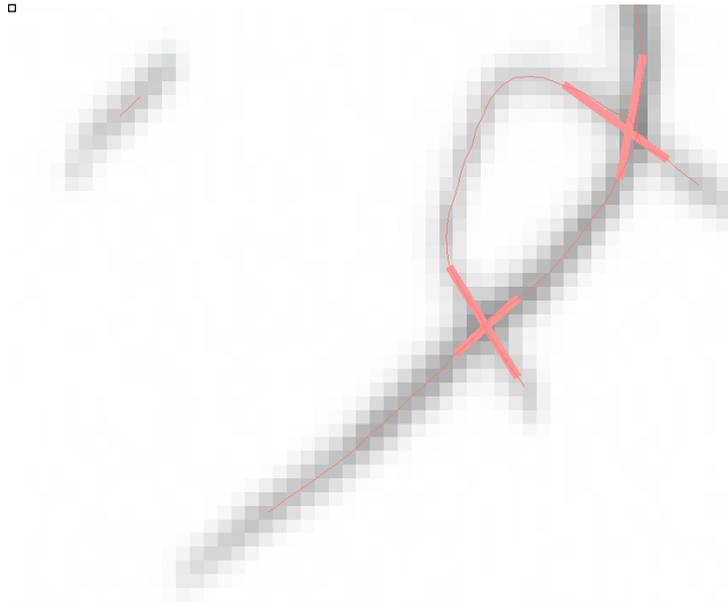


Abbildung 5-7: Ergebnis der automatischen Berechnung der Kreuzungshypothesen. Die in Zartrosa eingezeichneten Verbindungen markieren wahrscheinliche Kreuzungsübergänge.

Zusätzliche Probleme treten durch die Heterogenität der Faseranteile auf. Sind die Einzelfasern allgemein recht gleichmäßig in Bezug auf die Breite und Dichte, so zeigt sich bei sog. Shives ein anderes Bild: Einerseits ist die Dichte dieser Faserbündel sehr viel höher, andererseits fallen sie zudem durch eine höhere Breite auf. Aufgrund dieser Merkmalsunterscheidung führt eine Anwendung des Skelettierungsansatzes bei dieser Art von Fasern nicht zum gewünschten Ergebnis (siehe Abbildung 5-8). Innerhalb des Faserbündels werden zahlreiche „virtuelle Verzweigungen“ erkannt, die eine korrekte Vermessung nahezu unmöglich machen.

Aus diesem Grund ist es notwendig für die Shives eine besondere Prozessierung einzuführen. Um sie von den anderen Fasern zu unterscheiden wird eine Modellannahme ausgenutzt: Der Benutzer definiert einen Dichte- und Breitenschwellenwert. Liegt ein Pixel oberhalb beider Schwellenwerte so nimmt das Verfahren an, dass dieser zu einem Shive gehört und führt für diesen eine spezielle anisotrope Filterung durch. Dabei werden die Pixel eines Shives mit einem Gauß'schen Filter geglättet, dessen Standardabweichung mit Entfernung zum Rand des Shives zunimmt. Dies führt zu einer Vereinfachung der enthaltenen Bildstruktur und erhöht somit auch die Chancen der anschließenden Skelettierung erheblich, eine korrekte Messung zu liefern.



Abbildung 5-8: Resultierendes Faserskelett bei Gleichbehandlung aller abgebildeten Fasertypen (oben) und bei Sonderbehandlung der enthaltenen Shives (unten)

5.3.7 Aktueller Stand der graphischen Benutzeroberfläche (GUI)

Ziel dieses Projektteils soll eine benutzbare Oberfläche zur Interaktion der Faser-Segmentierung und Vermessung von Fasern sein. Daher wurde von Beginn an und parallel zu den Algorithmen eine GUI entwickelt, die mit dem Fortschreiten der Arbeiten permanent weiter entwickelt worden ist.

Als Entwicklungswerkzeug für die GUI wurde das Qt Framework gewählt, welches eine weitestgehende Unabhängigkeit vom Betriebssystem sicherstellt. So ist es möglich, die Endanwendung am Ende des Projektes für die gängigsten Systemtypen (Windows, Linux und Mac OS X) bereitzustellen. Zudem bietet das Framework bereits eine Grundlage zur Programmierung von zweidimensionalen interaktiven Grafiken (das QGraphicsScene-Framework). Durch dieses konnte die Faseransicht der GUI von Anfang an bereitgestellt werden. Im Laufe der Entwicklung wurden lediglich Performance-Optimierungen vorgenommen sowie die Funktionalität und der interaktive Umgang mit den Daten erweitert.

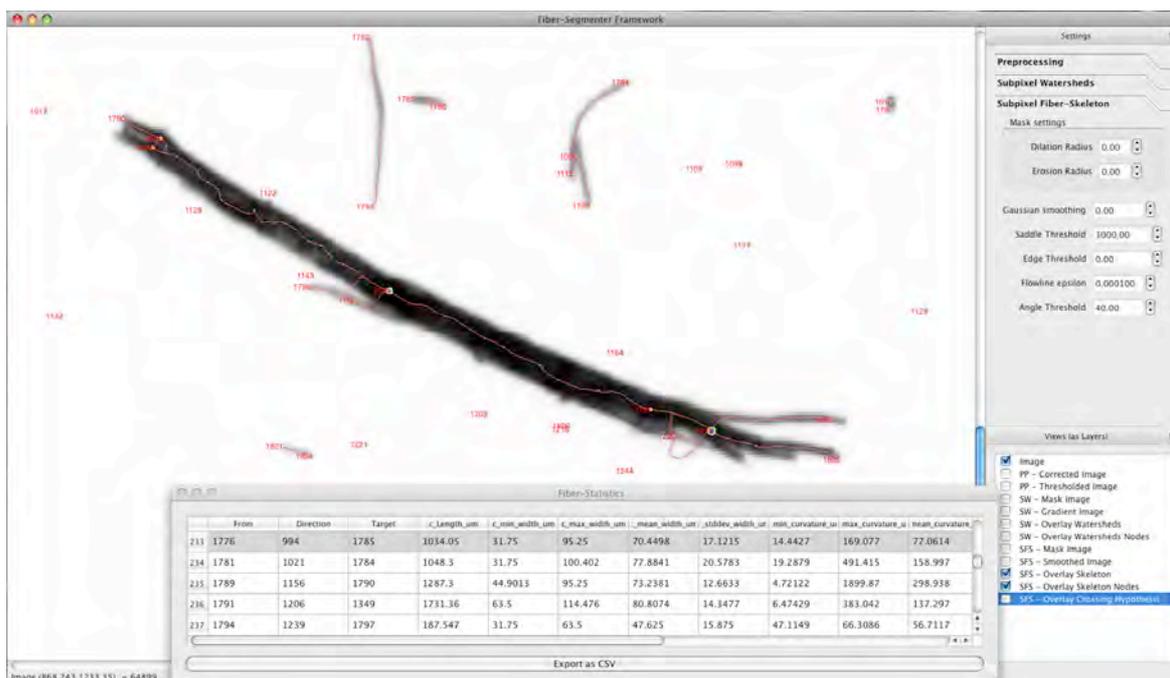


Abbildung 5-9: Die aktuelle GUI: Rechts oben befinden sich die Einstellmöglichkeiten, darunter die Auswahlboxen für die verschiedenen Anzeigoptionen. Der aktuelle Inhalt wird im Hauptfenster links angezeigt. In der Fußzeile werden aktuelle Intensitätswerte unter der Mausposition angezeigt.

In der GUI lassen sich die einzelnen Berechnungsparameter der unterschiedlichen Verarbeitungsschritte einstellen, um so direkt die Veränderungen am Endergebnis beurteilen zu können. Dabei können einzelne Verarbeitungsschritte wahlweise in der Anzeige ein- oder ausgeblendet werden (siehe Abbildung 5-9). Außerdem lässt sich der Inhalt des Hauptfensters in mehreren Stufen vergrößern oder verkleinern. Die aktuelle Ansicht kann zudem jederzeit als PDF exportiert werden.

Nach erfolgreicher Berechnung der wichtigsten Fasereigenschaften öffnet sich zudem ein weiteres Fenster, welches eine Tabelle der momentanen Messung enthält (Abbildung 5-9, unten). Dieses Fenster wird als „Statistikansicht“ bezeichnet. Es kann auf zweierlei Arten genutzt werden:

1. Eigenschaften einzelner Fasern prüfen

Dazu muss im Hauptfenster in die Nähe einer Faser geklickt werden. In der Statistikansicht wird sofort zur Zeile der aktuellen Faser gesprungen. Zudem wird diese Zeile als aktuelle Zeile markiert und ermöglicht ein sofortiges Ablesen der ermittelten Werte.

2. Datenweitergabe an externe Programme

Unter der Tabelle der Statistikansicht befindet sich ein Schalter „Export as CSV“. Drückt man auf diesen wird der gesamte Inhalt der Tabelle in eine Komma-separierte Textdatei geschrieben. Diese kann dann mit Statistik-Programmen eingelesen und ausgewertet werden. Da nahezu jedes Statistik-Programm das CSV-

Format unterstützt, wird dem Benutzer die Wahl des Analysewerkzeuges offen gelassen.

Dadurch, dass im Hauptfenster vor der Analyse der Holzfasern ein Wert für die Bildauflösung (z.B. 1600dpi) eingegeben wurde, werden alle abgeleiteten Faserkennzahlen in Mikrometern angegeben. Dies erlaubt einen besseren Vergleich zu manuellen, mikroskopischen Messungen.

5.3.8 Mikroskopische Referenzmessungen von Fasermaterial

Jegliche Messung von Objekten setzt eine Kalibrierung der Messeinrichtung voraus. Zur Schaffung von Referenzdaten wurden verschiedene mikroskopische Referenzmessreihen mit der Bildanalysesoftware „Analysis 5.0 (build1026, Soft Imaging System GmbH) und der Software CellF 2.5 (build1154 Olympus Soft imaging GmbH) am Durchlichtmikroskop Typ Olympus BX51 durchgeführt.

5.3.9 Versuchsreihe 1: manuelle Vergleichsmessungen

Um die komplexe Längenvermessung von TMP-Fasern anhand von Referenzmessungen zu verifizieren, mussten zuerst die Personenabhängigen Messfehler untersucht werden. Hierzu wurde eine Probe (Abbildung 5-10) mit 136 Fasern von 3 verschiedenen Prüfern vermessen (Abbildung 5-11).



Abbildung 5-10: Binärbild von Testfaserescan mit 4000 dpi (Minolta Dimage Scan Elite 5040)

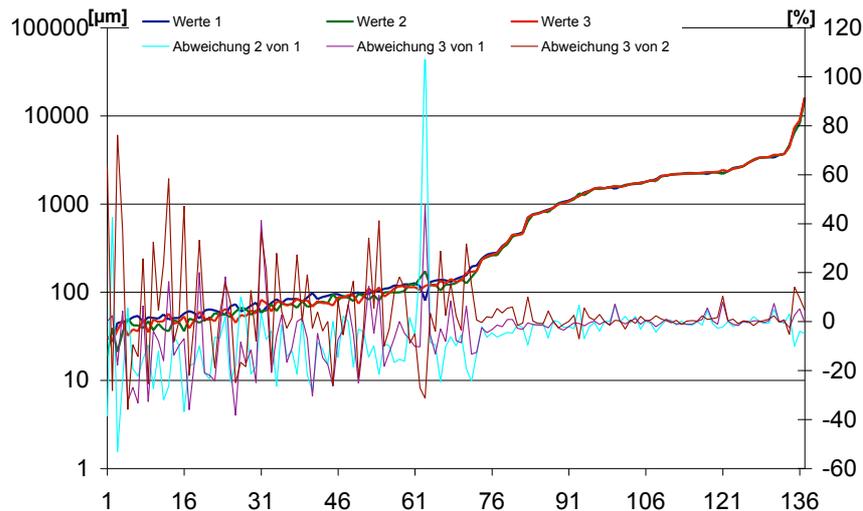


Abbildung 5-11: Vergleich der manuellen Messung von TMP-Fasern von drei Prüfern. Links die Faserlänge, rechts die prozentuale Abweichung, x-Achse= Fasernummer.

Die prozentuale Abweichung der einzelnen Messwerte liegt bei Fasern > 250 μm (Faser 76) unter 10 %. Auffällig ist bei der Messung anhand eines offenen Polygons ist, dass die stärksten Abweichungen der Messwerte bei kleinen rundlichen Partikeln mit geringem Feret-Verhältnis und bei verzweigten Fasern auftreten (Abbildung 5-12). Hier wurden Schwierigkeiten bei der Entscheidungsfindung bzgl. des Hauptastes der Faser im Zuge der Längenmessung entlang der Mittelachse festgestellt. Diese Problematik wird auch bei der späteren Implementierung von Entscheidungsalgorithmen in die Messsoftware berücksichtigt.



Abbildung 5-12: Stark verzweigte Faserformen

5.3.10 Versuchsreihe 2: manuelle Vergleichsmessungen

Weitere Referenzwerte wurden anhand der Vermessung von 517 Fasern auf zwei Bildern im TIFF-Format mittels der Analysis-Software und offenen Polygonlinien vermessen. Als relevante Kenngrößen der zweidimensionalen Faserprojektionen wurden die Länge entlang der virtuellen Mittellinie, die durchschnittliche Faserbreite und bei zwanzigfacher Vergrößerung mikroskopisch sichtbare Knicke und Krümmungen identifiziert. Zusätzlich wurden Nebenarme mit Längen > 50 μm in die Datenbank mit aufgenommen. Die Längenverteilung der Fasern beider Bilder ist in Abbildung 5-13 dargestellt.

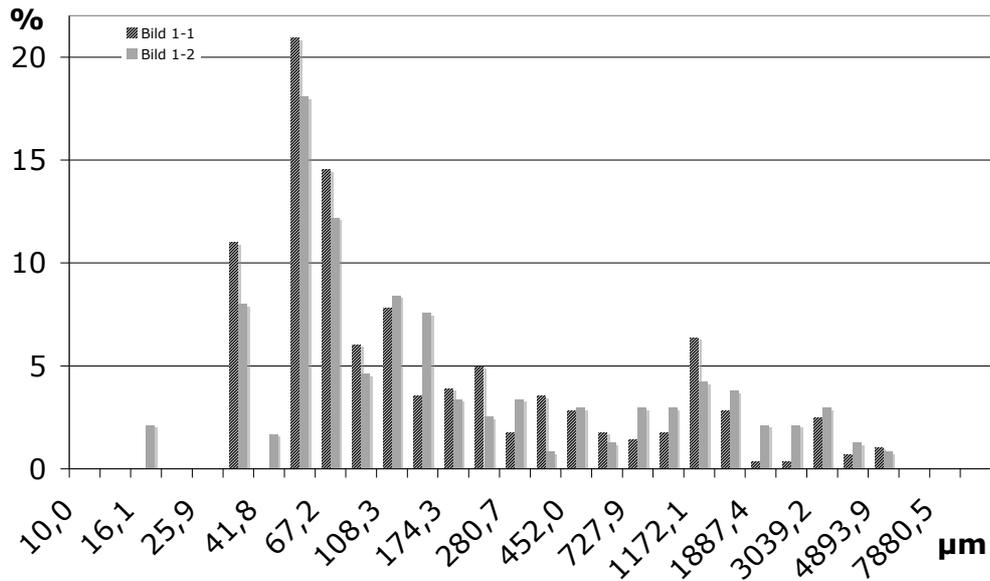


Abbildung 5-13: Längenverteilung von Projektionen der 517 manuell vermessenen Fasern zweier Sample-Bilder der gleichen Fasercharge in 30 Klassen (logarithmische X-Achsen-Skalierung)

Die relative Größenverteilung zeigt bei beiden Proben einen ähnlichen Trend auf. Eine weitere Auswertung fand bisher nicht statt, da die Daten nur als Referenzmessungen für die Messsoftware dienen. Die Breitenverteilung zeigt ähnlich der Längenverteilung ein Maximum bei circa 65 µm.

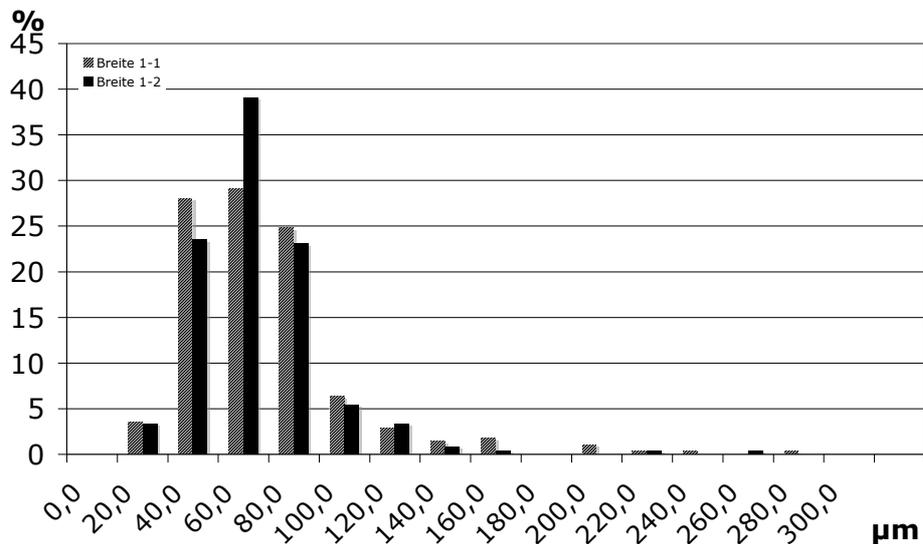


Abbildung 5-14: Breitenverteilung von Projektionen der 517 manuell vermessenen Fasern zweier Sample-Bilder der gleichen Fasercharge in 30 Klassen

5.4 Parameteranpassung der Faseranalysesoftware

Die Hauptparameter der Software lassen sich in die drei Prozessschritte aufteilen, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden: Die Vorverarbeitung der geladenen Bilder, die Segmentierung und die Skelettierung bzw. die Analyse des Faser-Skeletts:

1. Vorverarbeitung

Hier kann mit „Invert Image“ das Bild invertiert werden, falls die Objekte dunkler als der Hintergrund sind. Da dies für die verwendeten Aufnahmen der Fall ist, ist das Feld standardmäßig aktiviert.

Unter „Image res. (dpi)“ kann die Auflösung des Bildes angegeben werden. Der Standardwert ist 1600 dpi. Falls Bilder anderer Auflösung verwendet werden, muss der Wert entsprechend angepasst werden. Er dient in der späteren Messung dazu, die Umrechnung Pixel \rightarrow μm zu vollziehen.

Mit „Threshold“ kann eine Grauwertschwelle angegeben werden, ab der ein Bildinhalt für einen Faseranteil angenommen wird. Je höher die Schwelle, desto weniger Objekte werden erkannt.

2. Segmentierungseinstellungen

Um die Segmentierung der Konturlinien der Fasern zu steuern, stehen, ähnlich der Erzeugung des Faser-Skeletts, einige Parameter bereit: Zunächst kann mit „Dilation Radius“ bzw. „Erosion Radius“ die Maske, die in der Vorverarbeitung erzeugt wurde, weiter ausgedehnt oder verkleinert werden.

Mit dem Parameter „Gaussian gradient“ kann die Skala (Standardabweichung) des Gauß'schen Gradientenoperators festgelegt werden, auf der die Kanten der Objekte detektiert werden. Je höher dieser Wert, desto mehr Details des Originalbildes und der darin enthalten Kanten gehen verloren.

Mit den Parametern „Saddle Threshold“ und „Edge Threshold“ lässt sich zudem die Erstellung der Segmentierung auf solche markanten Punkte und Kanten beschränken, die oberhalb einer Schwelle liegen. Das bedeutet, dass „schwache“ Kanten bereits in diesem Schritt anhand ihrer Kantenstärke entfernt werden können.

3. Faser-Skelett-Einstellungen

Die Einstellungen, die für die Erstellung des Faserskeletts benötigt werden, ähneln denen der Segmentierung recht stark. Dennoch besitzen sie an dieser Stelle im Programm eine leicht veränderte Bedeutung:

Mit „Dilation Radius“ bzw. „Erosion Radius“ kann die Maske der Vorverarbeitung angepasst werden, innerhalb der nach Faserskeletten gesucht werden soll.

Mit dem Parameter „Gaussian smoothing“ kann die Skala (Standardabweichung) des Gauß'schen Glättungsoperators festgelegt werden, auf der die Skelette der Fasern detektiert werden. Je höher dieser Wert, desto mehr Details des Originalbildes gehen verloren, die Faserskelette erscheinen „geglättet“.

Mit den Parametern „Saddle Threshold“ und „Edge Threshold“ lässt sich die Erstellung der Faserskelette auf markante Punkte und starke Kanten beschränken, die oberhalb der jeweiligen Schwelle liegen. Diese Werte sollten nur sehr zaghafte verändert werden, da sie recht schnell zur Trennung von Faserskeletten führen, die im Laufe der weiteren Analyse nicht mehr korrigiert werden können.

Mit „Angle Threshold“ kann zudem ein maximaler Winkel angegeben werden, bis zu dem eine Faser noch über eine Kreuzung hinaus verlängert werden kann. Sollte es zwar Möglichkeiten geben, eine Faser an einer Kreuzung zu verlängern, liegt der Winkel der dabei entstehen würde aber über dem angegebenen Schwellenwert, so wird die Hypothese verworfen.

5.5 Generierung von Messdaten aus gewonnenem Probenmaterial

Die automatische Ermittlung von Messdaten lässt sich als mehrschrittiges Vorgehen beschreiben (vgl. 5.3.4 - 5.3.6). Sollten die Bilder des Fasermaterials unter ähnlichen der gleichbleibenden Bedingungen erstellt worden sein, so können zudem die Parameter der Software fest eingestellt bleiben und Bild für Bild vom Benutzer in das Programm geladen werden, wo es automatisch verarbeitet wird.

Die automatische Gewinnung der Messdaten lässt sich in folgende Teilschritte unterteilen, die in einer festgelegten Reihenfolge stattfinden:

1. Bild -> S/W-Bild
2. Zusammenhangskomponenten
3. Subpixel-Wasserscheiden
4. Subpixel-Faser-Skelett
5. Überführung Graphen-Repräsentation
6. Graphentheoretische und geometrische Analyse (z.B. Kreuzungshypothesen aufstellen)
7. Ablaufen des Graphen und Sammeln der Messungen

Die Punkte 1 - 6 wurden bereits in den Abschnitten 5.3.4 - 5.3.6 ausführlich behandelt, weshalb in diesem Abschnitt lediglich das Sammeln der Messungen genauer erläutert werden soll.

Nach der Erstellung des Graphen und der Analyse der Kreuzungen besteht der erweiterte Graph nun aus Knoten, Kanten und einer Menge an wahrscheinlichen Wegen über Kreuz-

zungen hinweg, welche wir als Bypässe bezeichnen. Dies ist deshalb wichtig, da man nur aufgrund des Graphen an einem Knoten mit mehr als zwei Nachbarn nicht entscheiden kann, in welche Richtung die Faser abgelaufen werden soll.

Zur Vermessung der Fasern wird zu dem eigentlichen Bild noch eine Distanztransformation der Maske, welche zur Segmentierung benutzt wird, erstellt. Dieses Bild gibt in jedem Pixel die Entfernung zum Rand der Maske an und wird im weiteren Verlauf der Messung zur Bestimmung der Faserbreite an einem Knoten verwendet, welcher durch die doppelte Distanz zum Rand an der Position des Knotens approximiert wird.

Der Algorithmus zum Ablaufen des Graphen und Einsammeln der Fasereigenschaften läuft wie folgt ab:

Für jeden Knoten K in G :

Falls K ist noch nicht markiert und

K hat nur einen Nachbarn oder

K hat mehr als einen Nachbarn, aber alle Nachbarn sind durch Bypässe über K hinweg verbunden

dann initialisiere neue Faser mit Feldern für:

- Länge,
- Breite (Minimum, Maximum, Mittelwert),
- Krümmung (Minimum, Maximum, Mittelwert),
- Intensität (Minimum, Maximum, Mittelwert)

markiere K ,

laufe den Pfad von K über seine Nachbarn ab

Falls mehr als ein nächster Nachbar zur Verfügung steht

dann prüfe ob es einen passenden Bypass gibt

Falls ja, folge diesem

Falls nein, terminiere

Falls kein Nachbar mehr zur Verfügung steht

dann terminiere

Während des Ablaufens, fülle bzw. aktualisiere die Felder der Fasereigenschaften.

sonst fahre mit nächstem Knoten fort

Abbildung 5-15: Schematischer Ablauf zur automatischen Gewinnung der Faserinformationen ausgehend von der Graphenrepräsentation

Nach Ablauf des Algorithmus sind für alle Fasern die nötigen Informationen gesammelt, die durch das Programm in einer Tabelle vorgehalten werden. Diese Tabelle kann anschließend mit Statistik- bzw. Visualisierungsprogrammen weiterverarbeitet werden.

5.6 Vergleich der Software-Messungen mit manuell erstellten Mikroskopie-Messungen

Zur Bestimmung der Güte der automatischen Messungsmethode wurden mehrere Faserproben die als Bildmaterial für die Software vorlagen sowohl automatisch als auch manuell vermessen. Die Messergebnisse wurden anschließend sowohl faserweise als auch in ihrer Gesamtheit verglichen.

Bei den Vergleichen von Faser zu Faser konnte die Funktionalität der GUI die Arbeit wesentlich erleichtern. Nach einem Klick in die Nähe einer Faser konnten sofort die errechneten Messparameter abgelesen werden. In der manuell erstellten Messung war dieses ein wenig komplizierter, da nach den Nummern der Einzelfasern in einer weiteren Tabelle nachgeschlagen werden musste.

Tabelle 5-2: Vergleich der ermittelten Faserlängen mit automatischem und manuellem Verfahren

Faser	Errechnete Länge in μm	Gemessene Länge in μm	Differenz in μm	Differenz in %
F76	999,44	994,66	4,78	0,48
F92	1320,58	1322,90	2,32	0,18
F95	761,97	768,94	6,98	0,92

Wie in Tabelle 5-2 zu sehen ist, sind die automatisch erstellten Messungen auf einzelnen Fasern sehr präzise. Die Abweichungen zu den Mikroskopie-Messungen sind sehr gering. Dies ist vermutlich auch darauf zurückzuführen, dass im Rahmen der manuellen Messung ebenfalls ein Pfad entlang der Faser „gezeichnet“ wird, und dessen Länge anschließend der Faser zugeordnet werden kann. Ähnlich verfährt auch der vorgeschlagene automatische Ansatz, der auf einer Skelettierung aufbaut.

Im Gegensatz zum Vergleich einzelner Fasern miteinander ist ein Vergleich einer großen Anzahl wesentlich komplexer. Dies betrifft sowohl die Darstellung als auch Interpretation der Ergebnisse. Für die hier vorgestellten Vergleiche wurden jeweils eine manuell vermessene mit einer automatisch vermessenen Faserprobe verwendet (Faserprobe 1-1 und 1-2). Bei der Darstellung der Ergebnisse wurde eine Histogramm-basierte Darstellung gewählt, wie sie bereits in den vorigen Kapiteln eingeführt wurde.

Obwohl die Histogramme in Abbildung 5-16 noch kleine Abweichungen aufweisen, so überwiegen doch die Korrespondenzen zwischen manueller und automatischer Vermessung der Fasern. Dies zeigt sich insbesondere in der hohen Korrelationsstärke der beiden Messungen (siehe Regressionsgerade in Abbildung 5-16).

Ein wenig auffällig ist der höhere Anteil kleinster Fasern in den berechneten Längenmessungen. Dies liegt jedoch darin begründet, dass die Software auch Feinanteile vermessen

hat, die oberhalb des Schwellenwertes der Bildsegmentierung lagen, wohingegen diese kleinen Partikel bei der manuellen Messung nicht mit einbezogen worden sind, um den ohnehin recht hohen Zeitaufwand nicht noch weiter zu erhöhen.

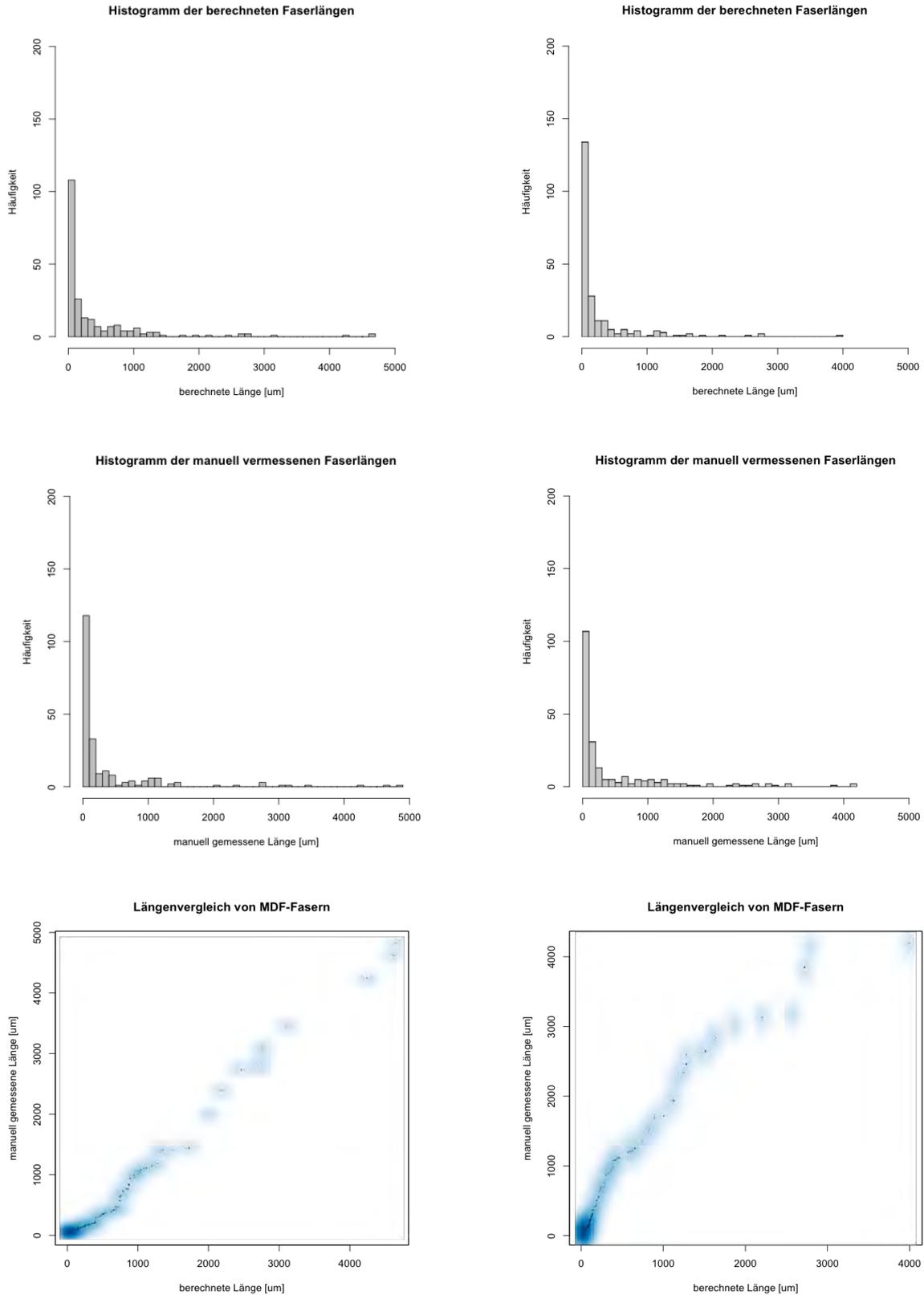


Abbildung 5-16: Vergleich der manuellen und berechneten Faserlängen für die beiden Datensätze 1-1 (links) und 1-2 (rechts)

5.7 Einschätzung des Zeitbedarfs

Die Software, die zu Projektende vorliegt, ist noch nicht vollständig auf eine hohe Performance optimiert, sondern ist vor allem unter funktionalen Aspekten entwickelt worden. Generell ließe sich der Prozess der automatischen Faseranalyse sicher noch stark beschleunigen, vor allem wenn die interaktive Benutzungsoberfläche nicht fortwährend angezeigt werden würde.

Dennoch ist die Software im aktuellen Status schon sehr gut benutzbar. Eine komplette Analyse eines Faserbildes mit mehr als 500 Fasern, zu trennenden und zu messenden Fasern benötigt nur wenige Sekunden Rechendauer auf aktuellen Computern. Dabei hängt die benötigte Rechenzeit nicht nur davon ab, wie viele Fasern auf dem Bild enthalten sind, sondern vor allem, wie viele Pixel oberhalb des Schwellenwertes liegen. Für all diese Pixel müssen Skelette berechnet, Hypothesen aufgestellt und eventuell Trennungen durchgeführt werden, bevor mit der eigentlichen Vermessung begonnen werden kann.

Die vorliegende Software führt bereits jetzt – verglichen mit manuellen Messungen – zu einer enormen Zeitersparnis bei gleichzeitig hoher Qualität der berechneten Messgrößen. Als Vergleichswert für die Dauer einer manuellen Messung von ca. 500 Fasern hat sich in Versuchen ein Wert von 1,2 Stunden ergeben.

6. Ergebnisse: Projektteil B Machbarkeitsstudie zur Bestimmung von geeigneten Bildakquise-Positionen im MDF-Prozess, vorrangig der vorverdichteten Fasermatte. Analyse der Machbarkeit von Merkmalsextraktionen der dort gewonnenen Bilder, mit der Zielsetzung das Potential einer Online-Shive-Erkennung zu erfassen.

6.1 Generierung und Sichtung von Bildern aus verschiedenen Positionen des MDF-Prozesses

Nach der Besichtigung der Prozesskette von der Fasergenerierung im Refiner bis zum Beginn der Heißpresse, wurden verschiedene Optionen zur Bildakquise innerhalb des Prozesses diskutiert. Als Ort der Messung wurde ein möglichst früher Punkt im Produktionsprozess festgelegt, um bei einer industriellen Umsetzung frühzeitig Messwerte zu erhalten. So ist eine kosteneffiziente Anwendung, mit schnellen Reaktionen auf Prozessveränderungen möglich. Als viel versprechende Bildakquisepunkte wurden der Faserbunker und die vorverdichtete Fasermatte genauer untersucht.

6.1.1 Faserbunker

Die Generierung von Bildern im oder am Faserbunker ist prozesstechnisch ein noch früherer Messpunkt als die vorverdichtete Fasermatte. Die Aufnahme innerhalb des Bunkers ist durch die starke Staubentwicklung technisch nicht umsetzbar. Eine gleich bleibende Bildqualität kann nur durch eine saubere Bildakquise garantiert werden. Die Aufnahmen durch die Scheibe des Bunkers (Abbildung 6-1) zeigen zwar eine relativ gleichmäßige Bedeckung der Wand, aber neben den zwischen Faserknäulen entstehenden Hohlräumen, macht auch hier die kontinuierliche Staubentwicklung und Festsetzung an der Innenseite der Scheibe eine gleichmäßige Bildakquise unmöglich.



Abbildung 6-1: Seitliche Aufnahmen des Faserbunkers durch die Glasscheibe.

6.1.2 Fasermatte

Die Aufnahme auf der Fasermatte ist vergleichsweise vorteilhaft. Die Staubentwicklung ist auf der vorverdichteten Matte geringer. Die Mattenoberfläche ist homogen, wenn auch durch die Struktur des Vorpressbandes eingedrückt ist.

Die Dampfentwicklung ist durch die geringe Mattentemperatur geringer als nach der Heißpresse. Dies ermöglicht eine stabile Bildgenerierung mit geringem Reinigungsaufwand.

6.2 Bildakquise

Die Bildakquise erfolgt über eine senkrecht über der Fasermatte angebrachte Kamera. Die Ausleuchtung wird durch zwei flackerfreie Leuchtstoffröhren gewährleistet. Beim ursprünglichen Aufbau wurde schnell festgestellt, dass die parallele Lampenausrichtung zur Schattenbildung auf der Mattenoberfläche führen kann. Der Versuchsaufbau wurde wie in Abbildung 6-2 dargestellt angepasst.

Dieser zweite Versuchsaufbau (Abbildung 6-3) führte bereits zu einer erhöhten Bildqualität, dennoch war die erreichte Qualität der Bilder noch nicht zufrieden stellend, um die Machbarkeitsstudie durchzuführen. Dies lag vor allem an dem immer noch zu hohen Fremdlichteinfluss und der zu hoch montierten Kamera, die in einer zu geringen Bildauflösung resultierte. Um diese Fehlerquellen zu beheben, wurde ein dritter Aufbau umgesetzt, bei dem die Kamera tiefer angebracht wurde und das Licht durch ein aufliegendes Brett verschattet wurde. Zusätzlich wurde ein Ringblitz angebracht, um die Ausleuchtung der Fasermatte zu verbessern (siehe Abbildung 6-4).



Abbildung 6-2: Versuchsaufbau 1: Die Leuchtstoffröhren hängen parallel neben der Kamera (Grecon).



Abbildung 6-3: Versuchsaufbau 2: Die Lampen beleuchten die Matte jetzt diagonal von den Seiten. Reflektionen und Schattenbildungen durch aus der Mattenoberfläche hoch stehende Faserstrukturen werden minimiert (Grecon).



Abbildung 6-4: Versuchsaufbau 3: Die Kamera besitzt nun einen Blitz und befindet sich auf Höhe der Leuchten, eine Verschalung wurde angebracht (Grecon).

6.3 Machbarkeitsanalyse zur industriellen Umsetzung einer prozessintegrierten Online-Shive-Erkennung

Werden die Fasern, so wie in dieser Arbeit vorgeschlagen, von oberhalb der Matte aufgenommen, so ist zunächst zu klären ob die Stichprobe an abgebildeten Fasern statistisch unabhängig ist. Dies wäre zum Beispiel dann nicht gegeben, wenn sich nach der Vorpresse überwiegend kurze oder lange Fasern an der Oberfläche der Matte befänden. Nur bei einer zulässigen Stichprobe ist das Vorgehen durchführbar.

Zu diesem Zweck wurde eine 21 mm dicke MDF im Format 220 mm x 168 mm Schichtweise geschliffen. Hierzu wurden 0,2 mm-Schichten in einer Breitbandschleifmaschine (Typ Bütfering Super 111L (BJ: 2001), Beckum) mit Schleifpapier mit 180er Körnung abgeschliffen. Nach jedem Schleifgang wurde die Plattenoberfläche erneut mit einer Auflösung von 800 dpi auf einem Flachbettscanner (Epson V750 Pro) gescannt.

Der auf diese Weise erzeugte Bildstapel musste zunächst vorverarbeitet werden. Zuerst wurden Helligkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Schichten korrigiert. Anschließend wurden die Einzelbilder anhand des aufgenommenen Randes registriert und übereinander gelegt. Die so gewonnenen 3D-Daten der Platte (Dimensionen: Länge, Breite, Tiefe) wurden noch beschnitten, so dass die Randbereiche nicht mehr sichtbar sind.

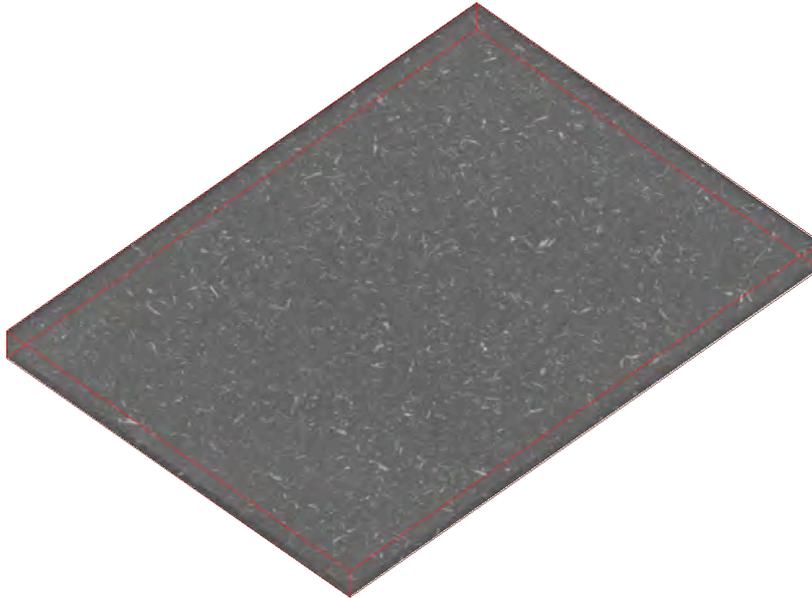


Abbildung 6-5: Der 3D-Datensatz einer MDF-Platte, dargestellt sind jeweils die maximalen Intensitäten

Nach der erfolgreichen Vorverarbeitung erhalten wir ein Volumendatensatz, wie in Abbildung 6-5 zu sehen. Auf diesem Datensatz wurden zunächst mittels eines Schwellenwertverfahrens die Shives, die in der Platte enthalten sind segmentiert. Diese sind bereits in Abbildung 6-5 sichtbar, und zwar als hellere, größere Regionen in der Platte.

Nach der Segmentierung wurden folgende Informationen zu jedem segmentierten Shive gespeichert:

- Position (Länge, Breite, Tiefe)
- Ausrichtung (jew. in alle Dimensionen)

Notwendige Bedingung für die Beobachtung der Matte von oben, ist dass die Anzahl der Shives unabhängig von der Tiefe ist. Außerdem sollte die Ausrichtung der Shives grundsätzlich eher in die Längen/Breiten-Ebene verlaufen. Denn Shives, die eher vertikal ausgerichtet sind, würden zu hohen Messfehler führen, falls man sie lediglich von oben aus betrachtet.

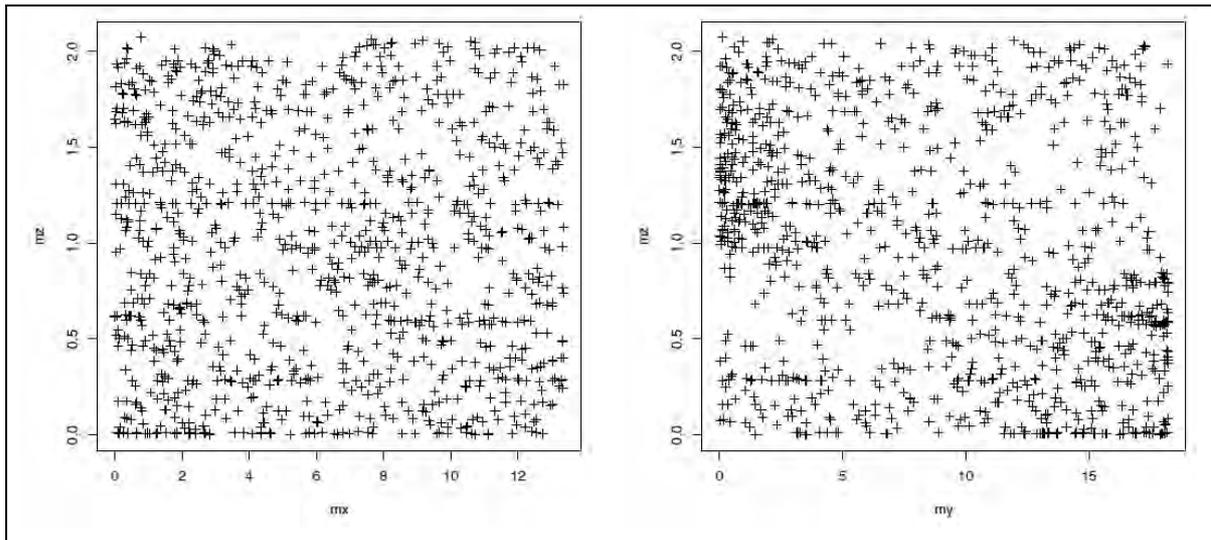


Abbildung 6-6: Vergleich der Schwerpunkts- Positionen der Shives in Längen- und Breiten-Richtung und Bezug auf die Schwerpunkts-Tiefe des Shives. Links: Breite vs. Tiefe, rechts: Länge vs. Tiefe.

Bis auf einzelne Schichten (bei ca. 0mm, 0,6mm und 1,2mm), an denen die Segmentierung aufgrund von Bildartefakten Probleme hatte die Shives korrekt vom Hintergrund zu trennen, kann aus der Abbildung 6-6 entnommen werden, dass die Shives in der Tiefe der Platte nahezu gleichverteilt vorkommen.

Diese Tiefen-Unabhängigkeit der Auftretswahrscheinlichkeit eines Shives führt zur Erfüllung der erste notwendige Bedingung, um die Matte von oben aus betrachten zu können. Für die Prüfung die Shive-Ausrichtung wurde die Orientierung aller Shives statistisch analysiert.

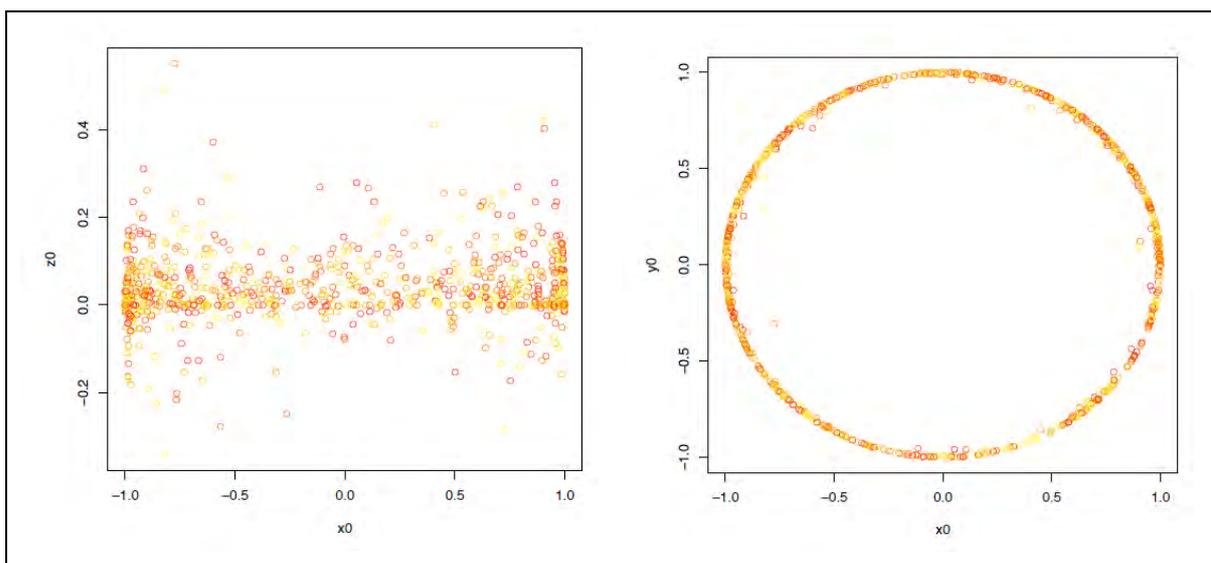


Abbildung 6-7:Verhältnis der Ausrichtungen der Shives von Breiten- zu Tiefen-Ausrichtung (links) und von Breiten- zu Längen-Ausrichtung (rechts).

Wie in Abbildung 6-7 zu erkennen ist, gibt es keine Faser, die hauptsächlich in die Tiefenebene ausgerichtet ist. Außerdem erkennen wir eine annähernde Gleichverteilung der vorhandenen Ausrichtungen innerhalb der Längen/Breiten-Ebene. Somit ist auch die zweite notwendige Bedingung erfüllt, um die Matte von oben aus betrachten zu können, ohne einen Fehler im Rückschluss von der gemessenen Stichprobe auf die Allgemeinheit zu erhalten.

6.3.1 Vergleich Fasermatte und resultierender Platte

Um den Einfluss des Pressvorgangs auf die Position der an der Oberfläche lokalisierten Shives zu überprüfen, wurden Bilder der Matte gemacht und die entstandene Platte nach der Heißpresse aus dem Prozess herausgenommen. Nach der Lokalisation der gleichen Stelle wurden die Positionen von Shives auf der Mattenoberfläche mit denen von Shives auf der Plattenoberfläche verglichen. Hierzu mussten zuerst durch das Pressband bedingte Unebenheiten und Presshaut entfernt werden.

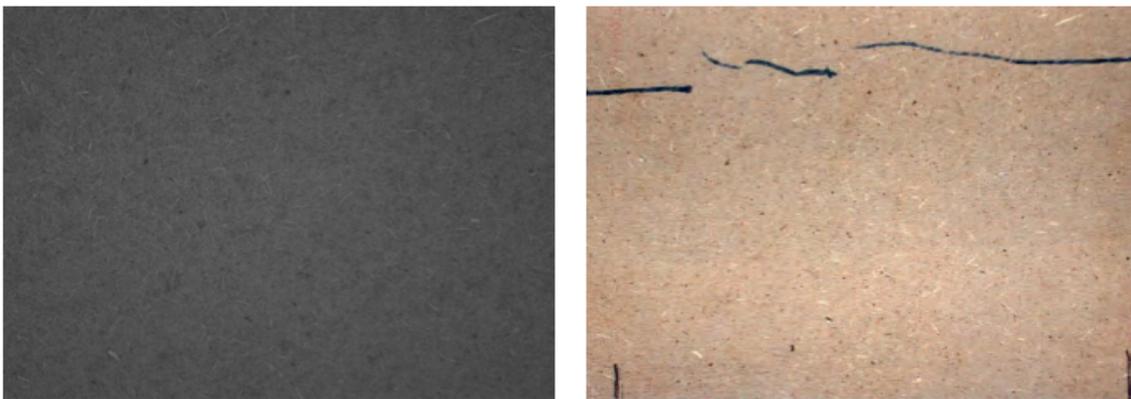


Abbildung 6-8: Vergleich einer Aufnahme der Fasermatte (links, vor der Heißpresse) und der resultierenden Platte (rechts, nach der Heißpresse)

Der Vergleich der in Abbildung 6-8 exemplarisch dargestellten Aufnahmen zeigt deutlich, dass es zu keiner Verschiebung der großen Partikel kommt und nicht nur die Position, sondern auch die Ausrichtung auf der Mattenoberfläche nicht beeinflusst werden. Durch die Positionsstabilität der Shives ist die Aussagekraft der Messung auf der Mattenoberfläche vor der Heißpresse im Bezug auf den Shive-Anteil an der Mattenoberfläche gewährleistet.

6.4 Merkmalsextraktion und Anwendung möglicher Segmentierungsverfahren

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde zunächst das bereitgestellte Bildmaterial gesichtet und analysiert. Anschließend wurden Verfahren zur Shive-Segmentierung entwickelt und experimentell erprobt. Den Abschluss dieses Abschnitts bilden die ersten Seg-

mentierungsergebnisse, die mit Hilfe der gewählten Merkmalsextraktion zurzeit möglich sind.

6.4.1 Bereitgestelltes Bildmaterial

Aufgrund des Schattenwurfs aus der ersten Versuchsreihe wird im Folgenden nur auf Bildmaterial eingegangen, welches im Rahmen des zweiten und dritten Versuchsaufbaus erzeugt wurde.

Die bereitgestellten Bilder des zweiten Versuchsaufbaus lassen sich zunächst grundsätzlich in zwei Klassen unterteilen: Grauwert- und Farbbilder. Um einen Eindruck davon zu bekommen, wie die Aufnahmequalitäten jeweils zu beurteilen sind, dient Abbildung 6-9.

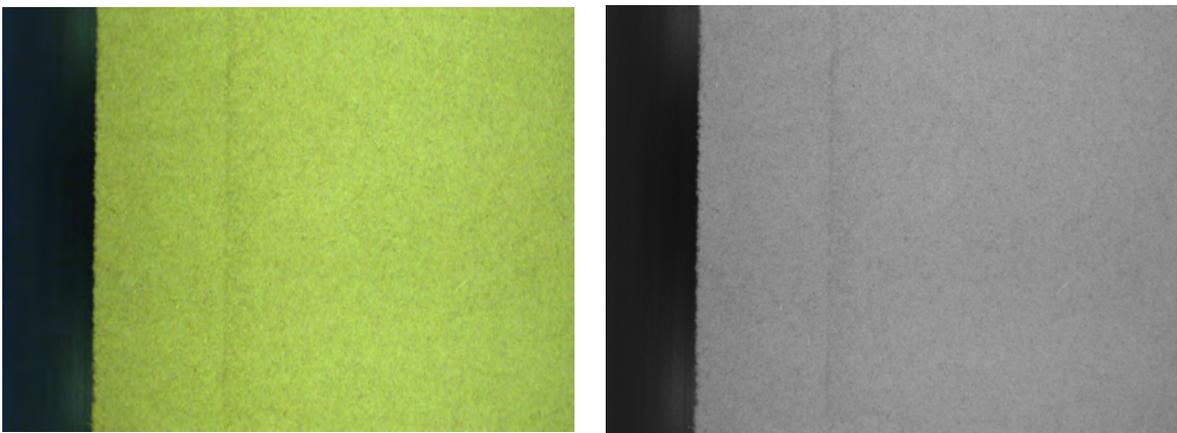


Abbildung 6-9: Vergleich des gelieferten Bildmaterials. Links Farbwertbild, rechts: Grauwertbild. Der Einsatz einer Farbkamera scheint keinen Mehrwert an Information zu liefern.

Nach sorgfältiger Sichtung der Bilder wurde sich für eine Beschränkung auf die Analyse von Grauwertbildern entschieden. Der durch den Einsatz einer Farbkamera bedingte erhöhte (technische) Informationsgehalt konnte weder menschlichen Betrachtern noch experimentellen Algorithmen dazu verhelfen, Shives besser aus den Aufnahmen zu extrahieren, als dies bei Grauwertbildern der Fall war.

Wie in Abbildung 6-9 zu erkennen ist, war der Aufnahmebereich der Kamera im zweiten Versuchsaufbau recht ungünstig gewählt da der Randbereich des Vorpressbandes deutlich auf den Bildern zu erkennen ist. Im folgenden Abschnitt wird zwar beschrieben, wie diese Struktur zu großen Teilen korrigiert werden kann, dennoch wurde ein dritter Versuchsaufbau angewendet, um Bilder höherer Qualität zu erhalten (siehe Abbildung 6-4).

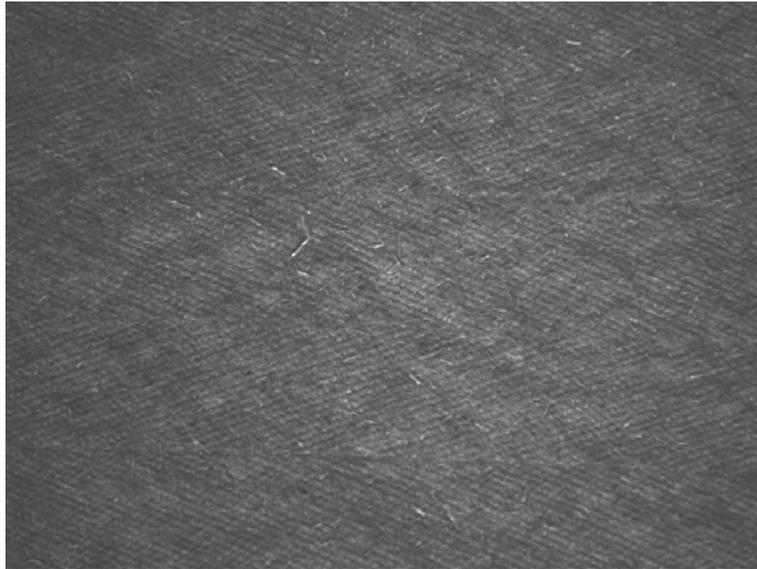


Abbildung 6-10: Beispielhaftes Bild des dritten Versuchsaufbaus. Deutlich zu erkennen ist die erhöhte räumlich Auflösung und die Struktur des Vorpressbandes

6.4.2 Vorverarbeitung der Bilder

Da das Rohbildmaterial der Kamera sowohl des zweiten als auch des dritten Versuchsaufbaus leider noch einige störende Strukturen enthält und sich somit nicht zur direkten Analyse eignet, wird im folgenden Abschnitt beschrieben, wie die Bilder vorverarbeitet werden müssen, um eine Shive-Analyse zu ermöglichen.

6.4.2.1 Vorverarbeitung der Bilder des zweiten Versuchsaufbaus

Zur weiteren Vorverarbeitung wurden die Bilder jeweils so abgeschnitten, dass der schwarze Randbereich des Förderbandes (siehe Abbildung 6-9) nicht mehr zu sehen ist. Nach diesem Vorverarbeitungsschritt verbleiben allerdings noch die Randstörungen der Vorpresse im linken Bildrandbereich. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die Kamera in horizontaler Richtung einen recht ausgeprägten Abfall der Helligkeit aufweist. In vertikaler Richtung scheint dieser Helligkeitsverlauf auch, und dass in vertikaler Richtung dieser weniger stark ausfällt.

Abbildung 4-18 zeigt ein ausgeschnittenes Bild und die zugehörigen Zeilen- und Spaltenhistogramme. Die Histogramme ergeben sich aus den Summen aller Pixel einer Zeile bzw. Spalte des Bildes. Da davon ausgegangen werden kann, dass die Matte grundsätzlich (gemittelt) einen homogenen Grauwert besitzen sollten, werden diese Histogramme im nächsten Schritt zur Korrektur des Bilder verwendet.

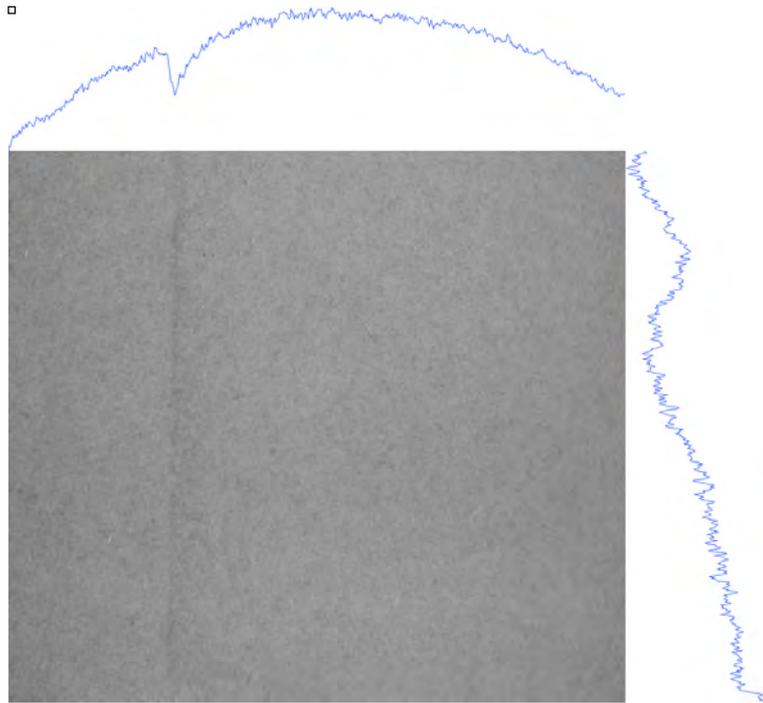


Abbildung 6-11: Das zugechnittene Ausgangsbild mit Spaltenhistogramm (oben) und Zeilenhistogramm (rechts)
Lokale Unterschiede in der Aufnahmehelligkeit sind deutlich zu erkennen.

Die Korrektur des Bildes besteht in einer Anpassung des Intensitätswerts eines Pixels anhand dieser beiden Histogramme. Da die Histogramme aber sehr starkem Rauschen unterliegen, müssen wie zunächst geglättet werden. Die Glättung wird im Rahmen der Experimente mit einem eindimensionalen Gauß'schen Weichzeichner durchgeführt. Nach diesem Glättungsschritt wird das Bild Pixel für Pixel korrigiert.

Es wird folgender Algorithmus verwendet:

1. Erstelle ein Zeilenhistogramm zh und finde den Mittelwert m des Bildes I
2. Führe eine Weichzeichnung auf zh durch
3. Korrigiere das Bild pixelweise: $lc(x,y) = I(x,y) - zh(y)/w$
4. Erstelle ein Spaltenhistogramm sh des korrigierten Bildes lc
5. Führe eine Weichzeichnung auf sh durch
6. Korrigiere das bereits korrigiert Bild erneut pixelweise: $lc(x,y) = lc(x,y) - sp(x)/h + m$
7. Liefere das korrigierte Bild lc zurück

Nach dieser Reihe von Vorverarbeitungsschritten sieht das korrigierte Bild wie in Abbildung 6-12 dargestellt aus. Die nun resultierende gleichmäßigere Gauwertverteilung ist deutlich zu erkennen.

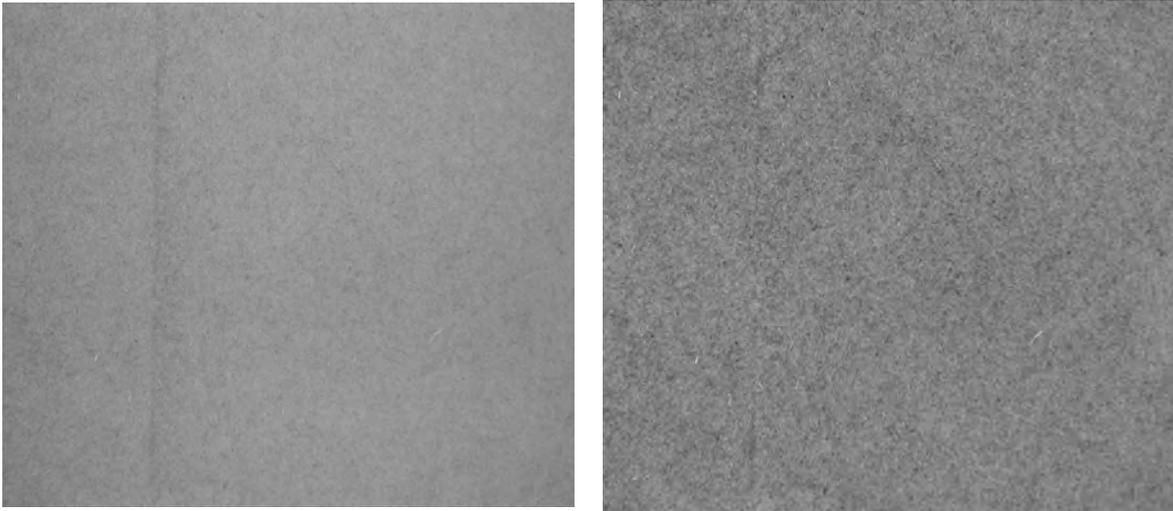


Abbildung 6-12: Das zugeschnittene Bild vor der automatischen Korrektur (links) und nach der Korrektur anhand der Zeilen- und Spaltenhistogramme.

Die weiteren Verarbeitungsschritte laufen ausschließlich auf diesen korrigierten Bildern ab. Experimente ohne eine Vorkorrektur der Bilder haben gezeigt, dass dies auch dringend notwendig ist, da Schwellwertverfahren in weiteren Schritten große Probleme mit den inhomogenen Ausleuchtung bekommen. Dennoch wäre es natürlich für weitere Aufnahmen wünschenswert, wenn die Bilder von vornherein eine bestmögliche Qualität aufweisen würden.

6.4.2.2 Vorverarbeitung der Bilder des dritten Versuchsaufbaus

Wie in Abbildung 6-10 zu erkennen ist, besteht das Problem der ungleichmäßigen Ausleuchtung auch im dritten Versuchsaufbau. Dennoch kommt in diesem Versuchsaufbau noch ein weiteres Problem hinzu: Die Bandstruktur der Vorpresse überlagert wichtige Strukturelemente der Matte. Diese Strukturen müssen folglich vor der weiteren Verarbeitung entfernt oder zumindest reduziert werden.

Da die Strukturen einem regelmäßigen Muster ähneln, wurde eine Analyse des Amplitudenspektrums des Bildes durchgeführt. Dieses Spektrum kann mit Hilfe der schnellen Fourier Transformation (FFT) berechnet werden. Statt das Spektrum eines einzelnen Bildes zu untersuchen, wurde für jeden Bilderstapel ein mittleres Spektrum erstellt. Dies geschieht unter der Annahme, dass alle Bilder eines Bildstapels unter den gleichen Aufnahmebedingungen entstanden sind.

Aufgrund der Regelmäßigkeit der störenden Strukturen erwarten wir einige hohe Ausschläge in gewissen Frequenzbereichen des Spektrums (sog. „Peaks“), die diese Struktur repräsentieren.

Diese unerwünschten Strukturen werden automatisch im Spektrum erkannt und mithilfe eines adaptiven Bandpass-Filters aus dem Frequenzraum entfernt. Anschließend wird der bearbeitete Frequenzraum wieder in den Bildraum zurück transformiert. Das daraus resultierende Bild ist von den Strukturen der Vorpresse befreit, ohne dass größere Teile des eigentlichen Bildinhaltes verloren gegangen sind. Zudem lässt sich im Frequenzraum die ungleichmäßige Ausleuchtung der Mattenaufnahme im gleichen Schritt korrigieren (vgl. Abbildung 6-10 und Abbildung 6-14).

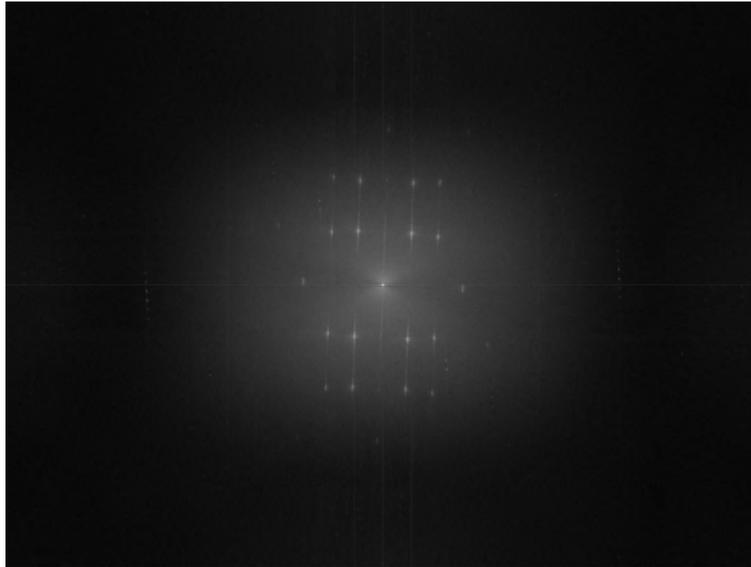


Abbildung 6-13: Das Amplitudenbetragsspektrum zum Bild aus Abbildung 6-10. Deutlich zu erkennen sind die strukturbedingten Frequenzanteile, die symmetrisch um den Mittelpunkt herum liegen.

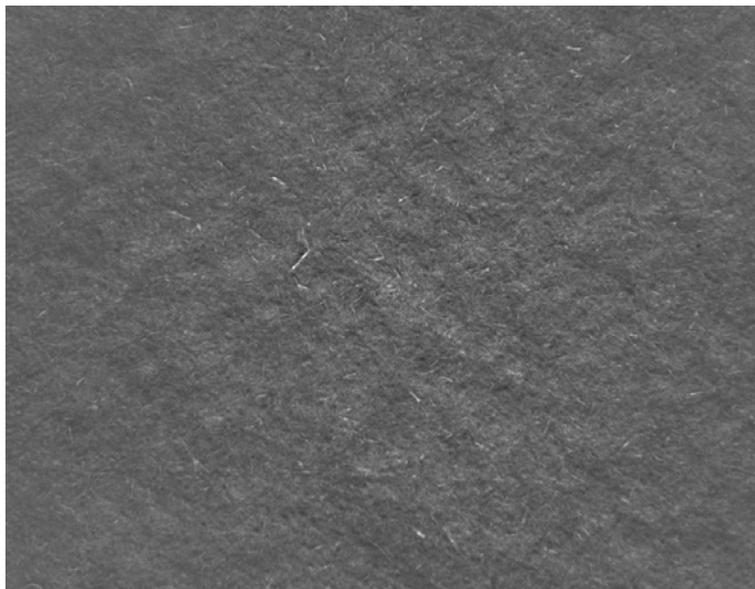


Abbildung 6-14: Das Bild aus Abbildung 6-10 nach der Korrektur. Die Unschärfe zum Rand ist nun deutlicher zu erkennen. Die meisten störenden Bandstrukturen konnten entfernt werden.

6.4.3 Merkmale für die Shive-Erkennung

Die vorverarbeiteten Bilder werden zunächst einem Schwellwertverfahren unterzogen. Dies liegt in der Grundannahme begründet, dass Shives aufgrund von Oberflächeneigenschaften auf der Fasermatte als „hellere Strukturen“ auftreten. Nach dem Schwellwertverfahren erhalten wir eine Vielzahl einzelner Bildregionen (siehe Abbildung 6-15 links), von denen sicherlich nicht alle tatsächlich Shives darstellen.

Daher wurde in Experimenten versucht herauszufinden wodurch sich Shives auszeichnen. Es wurden zu diesem Zwecke mehrere Parameter festgelegt, die zu einer Modellannahme führen. Mit diesem Modell sollen dann anschließend die Regionen, die Shives repräsentieren, aus der großen Masse der gefundenen Regionen „herausgesiebt“ werden.

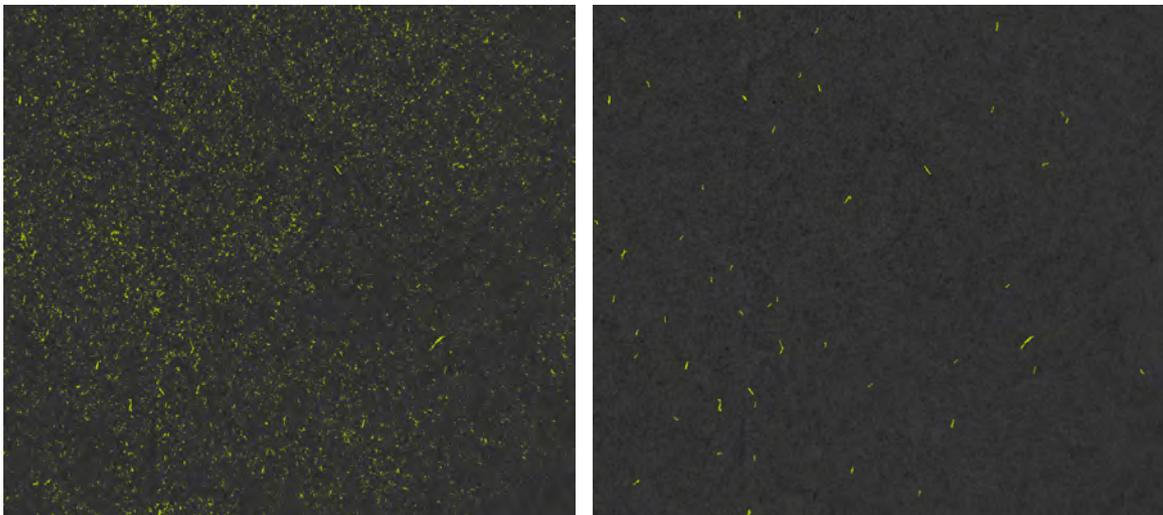


Abbildung 6-15: Die Ergebnisse der modellbasierten Segmentierung (ausgehend vom korrigierten Bild). Links: Alle gefundenen Regionen. Rechts: Regionen, die folgende Kriterien erfüllen: minimale Größe: 8px, minimale Länge der Hauptachse: 4px, minimale Exzentrizität: 0.8.

Das Ergebnis einer solchen modellbasierten Segmentierung zeigt Abbildung 6-15 eindrucksvoll. Auch wenn die drei gewählten Modellparameter sicher noch nicht ausreichend sind, um einen Shive auf der Fasermatte zu erkennen, so sehen diese erste Resultate versprechend aus. In Tests mit Probanden hat sich zudem gezeigt, dass das implementierte Verfahren bereits eine hohe Trefferquote verglichen mit menschlichen Klassifikationen aufweist.

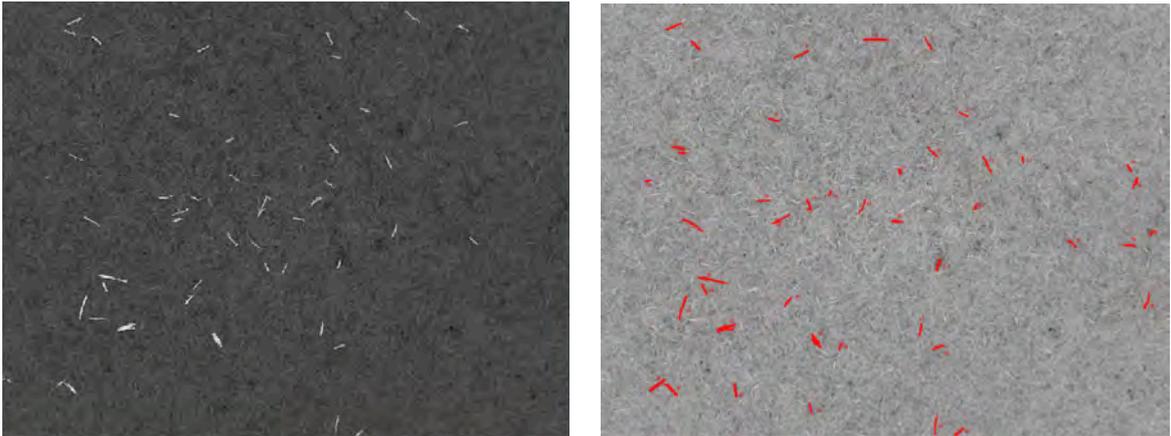


Abbildung 6-16: Vergleich der automatisch detektierten Shives (links, weiß hervorgehoben) mit manuell klassifizierten Shives (rechtes, rot hervorgehoben)

7. Verwertung

7.1 Projektteil A

Die erfolgreiche Durchführung des Projektes zeigt, dass die Messung einzelner Fasern durchführbar ist. Entscheidend für die Messung von Einzelfasern und deren industrielle Umsetzung wird jedoch der Zeitaufwand sein. Bisher ist eine industrienähe Messung noch nicht möglich. Neben der Verbesserung der genauen jedoch langsamen Software bedarf es noch der Entwicklung entsprechender Hardware zur Vereinzelung der Fasern, um automatisiert eine große Anzahl von Fasern zu messen und die Bildgenerierung zu automatisieren.

7.2 Projektteil B

Die Machbarkeitsstudie zeigt, wie in Kapitel 6.3 beschrieben, dass die Messung von Shives auf der Mattenoberfläche durch die statistische Verteilung derselben in der Platte möglich ist. Eine Berücksichtigung verschiedener Streuköpfe fand im Rahmen dieses Projektes noch keine Anwendung. Durch die Anpassung des Aufbaus der Bildakquise und eine Automatisierung der Shive-Erkennung sollte eine Einbindung in industrielle Herstellungsprozesse möglich sein. Aufgrund begrenzter Auflösung und Rechnerleistung ist eine Messung auch kleinerer Fasergrößen auf der Mattenoberfläche derzeit nicht möglich.

Literaturverzeichnis

- Beck, M. (1996) Partikelgrößenanalyse von Fasern durch automatische Bildanalyse; Fakultät Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, München (p.93)
- Benker, B.; Plinke, B.; Erbreich, M. (2003) Messverfahren zur morphologischen Charakterisierung von Faserstoff für die Herstellung mitteldichter Faserplatten (MDF); Schlussbericht des AiF-Vorhabens Nr. 12590 N,
- Buchholzer, P. (1998) Einfluss der chemischen Hackschnitzelbehandlung bei der MDF-Herstellung. Teil 1: Einfluss der Hackschnitzelbehandlung auf die Holz- und Fasereigenschaften sowie der Leistungsaufnahme des Refiners während des Holzaufschlusses; Holz-Zentralblatt, 124 7, (p.93-94)
- Deppe, H.-J.; Ernst, K. (2000) Taschenbuch der Spanplattentechnik; Leinfelden-Echterdingen 4
- European Panel Federation, (2007) EPF- Annual Report;
- Frühwald, A.; Scharai-Rad, M.; Hasch, J., (2000) Ökologische Bewertung von Holzwerkstoffen - Ergänzt in den Bereichen Spanplattenrecycling und OSB-Bilanzen; Schlussbericht, (p.171)
- Gran, G.; Bystedt, I. (1973) Latest Developments in Pressurized-Refining with Defibrator Equipment; Symposium on Particleboard, Washington
- Groom, L.; Mott, L.; Shaler, S. (1999) Relationship between Fiber Furnish Properties and the Structural Performance of MDF; 33rd International Particleboard/Composite Materials Symposium, Pullman, Washington, USA
- ISO 13322-1 (August 2004) Particle Size Analysis - Image Analysis Methods, Part 1: Static Image Analysis
- Kehr, E. (1977) Verfahren zur Herstellung von Faserplatten mittlerer Dichte – MDF; Holztechnologie, 18 2, (p.67-76)
- Kuntzsch, T. (2007) Effektive Bewertung von Trennprozessen in der Stoffaufbereitung durch moderne fasermorphologische Messverfahren; PTS-Forschungsbericht,
- Lilie, B.; Krug, D.; Mäbert, M.; Mraz, P. (2006) MDF-Heimspiel - Dresden macht Dampf - neuer Andritz-Refiner im IHD installiert; MDF-Magazin. Supplement von Holz-Zentralblatt und HK, 12. Jahrgang (p.68-72)
- Meine, H.; Köthe, U. (2006) A New Sub-pixel Map for Image Analysis; R. Reulke, U. Eckardt and B. Flach; 11th Int. Workshop on Combinatorial Image Analysis, Berlin
- Müssig, J.; Rettig, D.; Harig, H. (2000) Systematik und Begrifflichkeit der Faserlängenmessung; Taschenbuch für die Textilindustrie, Münchberg 1 (p.103-111)
- Nelson, N.D. (1973) Effects of wood and pulp properties on medium-density, dry-formed hardboard; Forest Products Journal, 23 9,

- Roffael, E.; Dix, B.; Bär, G.; Bayer, R. (1994) Über die Eignung von thermo-mechanischem und chemo-thermo-mechanischem Holzstoff (TMP und CTMP) aus Buchen- und Kiefernholz für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF) Teil 1: Aufschluss des Holzes und Eigenschaften der Faserstoffe; Holz als Roh- und Werkstoff, 52 4, (p.239-246)
- Roffael, E.; Dix, B.; Bär, G.; Bayer, R. (1995) Über die Eignung von thermo-mechanischem und chemo-thermo-mechanischem Holzstoff (TMP und CTMP) aus Buchen- und Kiefernholz für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF). Teil 3: Eigenschaften von aus Kieferfaserstoff hergestellten MDF; Holz als Roh- und Werkstoff, 53 (p.8-11)
- Schmid, H.G.; Dvorak, M.; Müller, J.; Müssig, J. (2004) Characterizing flock fibres using quantitative image analysis; Flock int trade journal for the flock industry, Flock Verlag Nüdingen, 113 (p.6)
- Schneider, T. (1999) Untersuchungen über den Einfluss von Aufschlussbedingungen des Holzes und der Faserstofftrocknung auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF); Göttingen Ph D (p.214)
- Xing, C; Wang, S; Pharr, G. M.; Groom, L. H. (2008) Effect of thermo-mechanical refining pressure on the properties of wood fibers as measured bey nanoidentation and atomic force microscopy; Holzforschung, 62 (p.230-236)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Schematische Darstellung typischer Faserverläufe, abgewandelt nach Müssig (2000).....	9
Abbildung 4-2: Längenmessmodelle zur Faserlängenbestimmung.....	10
Abbildung 4-3: USAF-1951 Test-Target (Scandig).....	13
Abbildung 4-3: Segmentierung einer einzelnen Holzfaser. Gelb: Ergebnis der Subpixel-Wasserscheiden-Segmentierung, Rot: Berechnetes Subpixel-Skelett der Faser.	15
Abbildung 4-4: Nach dem Schwellwert-Verfahren lassen sich die einzelnen Zusammenhangskomponenten unabhängig voneinander untersuchen. In diesem Beispiel gibt es 7 Zusammenhangskomponenten.....	16
Abbildung 4-5: Links: Durch das Subpixel-Skelett können die Skelett-Linien hinsichtlich ihrer Länge unterschätzt werden. Rechts: Korrektur der Länge durch Regionsinformationen über das Faserende.	18
Abbildung 4-6: Ergebnis der automatischen Berechnung der Kreuzungshypothesen. Die in Zartrosa eingezeichneten Verbindungen markieren wahrscheinliche Kreuzungsübergänge.....	19
Abbildung 4-7: Resultierendes Faserskelett bei Gleichbehandlung aller abgebildeten Fasertypen (oben) und bei Sonderbehandlung der enthaltenen Shives (unten).....	20
Abbildung 4-8: Die aktuelle GUI: Rechts oben befinden sich die Einstellmöglichkeiten, darunter die Auswahlboxen für die verschiedenen Anzeigoptionen. Der aktuelle Inhalt wird im Hauptfenster links angezeigt. In der Fußzeile werden aktuelle Intensitätswerte unter der Mausposition angezeigt.....	21
Abbildung 4-9: Binärbild von Testfaserscan mit 4000 dpi (Minolta Dimage Scan Elite 5040)	22
Abbildung 4-10: Vergleich der manuellen Messung von TMP-Fasern von drei Prüfern. Links die Faserlänge, rechts die prozentuale Abweichung, x-Achse= Fasernummer.	23
Abbildung 4-11: Stark verzweigte Faserformen	23
Abbildung 4-12: Längenverteilung von Projektionen der 517 manuell vermessenen Fasern zweier Sample-Bilder der gleichen Fasercharge in 30 Klassen (logarithmische X-Achsen-Skalierung).....	24
Abbildung 4-13: Breitenverteilung von Projektionen der 517 manuell vermessenen Fasern zweier Sample-Bilder der gleichen Fasercharge in 30 Klassen.....	24
Abbildung 4-15: Schematischer Ablauf zur automatischen Gewinnung der Faserinformationen ausgehend von der Graphenrepräsentation.....	27

Abbildung 4-16: Vergleich der manuellen und berechneten Faserlängen für die beiden Datensätze 1-1 (links) und 1-2 (rechts)	30
Abbildung 5-1: Seitliche Aufnahmen des Faserbunkers durch die Glasscheibe.	32
Abbildung 5-2: Versuchsaufbau 1: Die Leuchtstoffröhren hängen parallel neben der Kamera.....	33
Abbildung 5-3: Versuchsaufbau 2: Die Lampen beleuchten die Matte jetzt diagonal von den Seiten. Reflektionen und Schattenbildungen durch aus der Mattenoberfläche hoch stehende Faserstrukturen werden minimiert.	34
Abbildung 5-4: Versuchsaufbau 3: Die Kamera besitzt nun einen Blitz und befindet sich auf Höhe der Leuchten, eine Verschaltung wurde angebracht.	34
Abbildung 5-5: Der 3D-Datensatz einer MDF-Platte, dargestellt sind jeweils die maximalen Intensitäten	35
Abbildung 5-6: Vergleich der Schwerpunkts- Positionen der Shives in Längen- und Breiten-Richtung und Bezug auf die Schwerpunkts-Tiefe des Shives. Links: Breite vs. Tiefe, rechts: Länge vs. Tiefe.	36
Abbildung 5-7:Verhältnis der Ausrichtungen der Shives von Breiten- zu Tiefen-Ausrichtung (links) und von Breiten- zu Längen-Ausrichtung (rechts).	36
Abbildung 5-8: Vergleich einer Aufnahme der Fasermatte (links, vor der Heißpresse) und er resultierenden Platte (rechts, nach der Heißpresse).....	37
Abbildung 5-9: Vergleich des gelieferten Bildmaterials. Links Farbwertbild, rechts: Grauwertbild. Der Einsatz einer Farbkamera scheint keinen Mehrwert an Information zu liefern.....	38
Abbildung 5-10: Beispielhaftes Bild des dritten Versuchsaufbaus. Deutlich zu erkennen ist die erhöhte räumlich Auflösung und die Struktur des Vorpressbandes.....	39
Abbildung 5-11: Das zugeschnittene Ausgangsbild mit Spaltenhistogramm (oben) und Zeilenhistogramm (rechts) Lokale Unterschiede in der Aufnahmehelligkeit sind deutlich zu erkennen.	40
Abbildung 5-12: Das zugeschnittene Bild vor der automatischen Korrektur (links) und nach der Korrektur anhand der Zeilen- und Spaltenhistogramme.	41
Abbildung 5-13: Das Amplitudenbetragsspektrum zum Bild aus Abbildung 5-10. Deutlich zu erkennen sind die strukturbedingten Frequenzanteile, die symmetrisch um den Mittelpunkt herum liegen.	42
Abbildung 5-14: Das Bild aus Abbildung 5-10 nach der Korrektur. Die Unschärfe zum Rand ist nun deutlicher zu erkennen. Die meisten störenden Bandstrukturen konnten entfernt werden.....	42

Abbildung 5-15: Die Ergebnisse der modellbasierten Segmentierung (ausgehend vom korrigierten Bild). Links: Alle gefundenen Regionen. Rechts: Regionen, die folgende Kriterien erfüllen: minimale Größe: 8px, minimale Länge der Hauptachse: 4px, minimale Exzentrizität: 0.8.43

Abbildung 5-16: Vergleich der automatisch detektierten Shives (links, weiß hervorgehoben) mit manuell klassifizierten Shives (rechtes, rot hervorgehoben).....44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Auflösung in DPI (<http://www.filmscanner.info/Aufloesung.html>)..... 13

Tabelle 5-2: Vergleich der ermittelten Faserlängen mit automatischem und manuellem Verfahren28