

# Untersuchung der Faserqualität von TMP für die MDF-Produktion

Abschlussbericht zum FNR-Vorhaben „Fiber-Impact“  
(FKZ: 22013211)

Jan T. Benthien, Sabrina Heldner, Martin Ohlmeyer, Christian Bähnisch,  
Jörg Hasener, Clemens Seidl, Alfred Pfemeter, Christian Kathmann

Thünen Report 34

**Bibliografische Information:**  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

*Bibliographic information:*  
*The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliography; detailed bibliographic data is available on the Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de)*

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter [www.ti.bund.de](http://www.ti.bund.de)

*Volumes already published in this series are available on the Internet at [www.ti.bund.de](http://www.ti.bund.de)*

**Zitationsvorschlag – Suggested source citation:**

**Benthien JT, Heldner S, Ohlmeyer M, Bähnisch C, Hasener J, Seidl C, Pfmeter A, Kathmann C** (2015) Untersuchung der Faserqualität von TMP für die MDF-Produktion : Abschlussbericht zum FNR-Vorhaben „Fiber-Impact“ (FKZ: 22013211). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 71 p, Thünen Rep 34, DOI:10.3220/REP1449071064000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

*The respective authors are responsible for the content of their publications.*



THÜNEN

## Thünen Report 34

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut  
Bundesallee 50  
38116 Braunschweig  
Germany

[thuenen-report@ti.bund.de](mailto:thuenen-report@ti.bund.de)  
[www.ti.bund.de](http://www.ti.bund.de)

ISSN 2196-2324

ISBN 978-3-86576-150-7

DOI:10.3220/REP1449071064000

urn:nbn:de:gbv:253-201512-dn056045-5

# Untersuchung der Faserqualität von TMP für die MDF-Produktion

Abschlussbericht zum FNR-Vorhaben „Fiber-Impact“  
(FKZ: 22013211)

Jan T. Benthien, Sabrina Heldner, Martin Ohlmeyer, Christian Bähnisch,  
Jörg Hasener, Clemens Seidl, Alfred Pfemeter, Christian Kathmann

Thünen Report 34

Jan T. Benthien, Sabrina Heldner und Dr. Martin Ohlmeyer  
Thünen-Institut für Holzforschung  
Leuschnerstraße 91c  
21031 Hamburg  
E-Mail: martin.ohlmeyer@ti.bund.de

Christian Bähnisch  
Universität Hamburg, Department Informatik, Arbeitsbereich KOGS  
Vogt-Kölln-Straße 30  
22527 Hamburg

Dr. Jörg Hasener  
Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG  
Hannoversche Str. 58  
31061 Alfeld

Clemens Seidl  
Andritz AG  
Eibesbrunnengasse 20  
1121 Wien, Österreich

Dr. Alfred Pfemeter und Christian Kathmann  
Sonae Indústria, SGPS, SA, c/o Glunz AG  
Grecostraße 1  
49716 Meppen

Braunschweig, Dezember 2015

**Thünen Report 34**

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema:

**Untersuchungen der Faserqualität von TMP für die MDF-Produktion**

Zuwendungsempfänger:

**Johann Heinrich von Thünen-Institut  
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald  
und Fischerei  
Institut für Holzforschung**

Förderkennzeichen:

**11NR132 bzw. 22013211**

Laufzeit:

**01.01.2012 bis 30.04.2014**

Datum der Veröffentlichung:

**01.12.2015**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Vorwort

Beim vorliegenden *Thünen Report* handelt es sich um den gemeinsamen Abschlussbericht der Kooperationspartner

- Thünen-Institut für Holzforschung, Hamburg, Deutschland,
- Fagus-GreCon Greten GmbH & Co.KG (GreCon), Alfeld, Deutschland,
- Andritz AG, Graz, Österreich, und
- Glunz AG, Meppen, Deutschland,

sowie der Unterauftragnehmer

- Universität Hamburg (UHH), Department Informatik, Arbeitsbereich Kognitive Systeme (KOGS), Hamburg, Deutschland, und
- Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH (IHD), Dresden, Deutschland,

zum Forschungsprojekt mit dem Titel

### „Untersuchung der Faserqualität von TMP für die MDF-Produktion“.

Das Projekt wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) unter dem Förderkennzeichen 22013211 (11NR132) sowie dem Kurztitel „**Fiber-Impact**“ gefördert. Durchgeführt wurde das Projekt in der Zeit vom 1. Januar 2012 bis 30. April 2014.

Das im vorliegenden Report beschriebene Forschungsprojekt führte Forschungsarbeiten fort, die im Rahmen der Vorgängerprojekte

- **Fiber-Vision** (Titel: Entwicklung einer Software zur bildanalytischen Qualitätskontrolle von Holzfasern für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF); Förderkennzeichen 22020506; Bearbeitungszeitraum: Januar 2009 bis Februar 2010; Projektträger: FNR) und
- **Fiber-View** (Titel: Konzipierung, Entwicklung und Erprobung eines Bildanalyse-Systems zur Erkennung von groben Faserelementen während des Herstellungsprozesses von mitteldichten Holzfaserverplatten (MDF). Die Oberflächenanalyse funktioniert dabei online zur Prozesssteuerung; Förderkennzeichen: KF2184403KM0; Bearbeitungszeitraum: Juni 2010 bis Oktober 2011; Projektträger: Aif Projekt GmbH; ZIM-Koop)

durchgeführt wurden.

## Danksagung

An dieser Stelle ein herzliches Dankeschön

- den Mitarbeitern der Projektpartner und Unterauftragnehmer für ihre engagierte Mitarbeit im Projekt:
  - Dr. Jörg Hasener (GreCon),
  - Clemens Seidl (Andritz),
  - Dr. Alfred Pfemeter und Christian Kathmann (Glunz),
  - Christian Bähnisch (KOGS),
  - Dr. Detlef Krug und Christoph Wenderdel (IHD),
- Herrn Dr. Benjamin Seppke (KOGS), der federführend an der Entwicklung der Faservermessungssoftware beteiligt war und maßgeblich zum Gelingen des aktuellen Projektes beigetragen hat,
- Herrn Dr. Christian Lanvermann (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Institute for Building Materials, Wood Physics, Zürich, Schweiz) für die Programmierung der Grundlagen, auf denen die aktuelle MatLab-Routine basiert,
- Herrn Reiner Ohrnberger und Herrn Florian Lösch (Norske Skog Walsum GmbH, Duisburg-Walsum, Deutschland) für die freundliche Charakterisierung der Hackschnitzel,
- Herrn Oliver Pieper und Herrn Wolfgang Bartz, die während ihrer Tätigkeit am Thünen-Institut für Holzforschung maßgeblich an der Entwicklung des Fasermessgerätes beteiligt waren,
- Frau Christina Waitkus (Fachinformationszentrum des Thünen-Instituts) für die geduldige Anfertigung verschiedenen Fotografien,
- Herrn Jonas Vagt (Thünen-Institut für Holzforschung) für seine Bereitschaft auf dem Foto des Fasermessgerätes Modell zu stehen,
- Frau Dörte Bielenberg (Thünen-Institut für Holzforschung) für die gewissenhafte Prüfung der MDF-Proben,
- Frau Stefanie Warsow (Thünen-Institut für Holzforschung) für den präzisen Zuschnitt der MDF-Prüfplatten,
- Frau Doerthe Schmidt (Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie) für die Anfertigung der Schemazeichnung des Messgerätes.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
1.1	Wirtschaftliche Bedeutung von MDF .....	3
1.2	MDF-Herstellung und Faserstoffqualität .....	3
1.3	Bestimmung der Faserstoffqualität .....	4
1.4	Bisherige Arbeiten zur Faservermessung .....	5
1.5	Ziel des Projektes.....	5
<b>2</b>	<b>Offline-Fasercharakterisierung.....</b>	<b>6</b>
2.1	Das Messgerät: Hardware und Steuerungs-Software .....	7
2.1.1	Aufbau des Messgerätes .....	7
2.1.2	Hardware-Steuerungssoftware .....	8
2.1.3	Kameradetails (Leistungsdaten): Optische Auflösung des Systems .....	9
2.2	Die Faservermessung: Bildakquise und -analyse .....	10
2.2.1	Grabber: Bildsammlung und -speicherung.....	10
2.2.2	Segmenter: Bilderkennung und Faservermessung.....	11
2.2.2.1	Bildvorverarbeitung.....	13
2.2.2.2	Faservermessung.....	13
2.2.2.3	Software-basierte Faserseparierung .....	14
2.3	Die MatLab-Routine: Datenauswertung und Ergebnisdarstellung .....	14
2.3.1	Problemstellung und Lösungsweg.....	14
2.3.2	Komplettierung der Basisdaten .....	15
2.3.3	Datenkomprimierung und deren Ausgabeformat .....	15
2.4	Der Fasersteckbrief: Erläuterung der Kennwerte und deren Berechnungswege .....	16
2.4.1	Faserstoff-Einwaage und Faseranzahl (absolut).....	18
2.4.2	Einwaage-bezogene Faseranzahl.....	18
2.4.3	Faserabmessungen.....	18
2.4.3.1	Mittlere Faserlänge .....	18
2.4.3.2	Mittlere Faserbreite .....	19
2.4.3.3	Schlankheitsgrad .....	19

2.4.4	Graphische Darstellung der doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeitsverteilung als geglättetes Häufigkeitspolygon.....	19
2.4.5	Doppelt-längengewichtete relative Häufigkeitsverteilung für fünf Faserlängenklassen (a) bis (e).....	20
2.4.6	Kennwerte auf Basis der doppelt-längengewichteten Summenhäufigkeitsverteilung.....	21
2.4.6.1	Feinheitskennwerte.....	21
2.4.6.2	Box-Whisker-Plot.....	22

<b>3</b>	<b>Laborversuche: Einfluss der Zerfaserungsparameter auf Faserstoffqualität und Platteneigenschaften .....</b>	<b>23</b>
3.1	Material und Methoden .....	23
3.1.1	Fasermaterial.....	23
3.1.2	Klebharz.....	25
3.1.3	Plattenherstellung .....	25
3.1.4	Faserstoff-Charakterisierung.....	25
3.1.5	Plattenprüfung .....	25
3.1.6	Statistische Analyse .....	26
3.2	Ergebnisse und Diskussion.....	26
3.2.1	Einfluss von Kochtemperatur und -dauer.....	27
3.2.1.1	a: Extreme Zerfaserungsbedingungen.....	27
3.2.1.2	b: Einfluss der Kochdauer bei 170 °C.....	28
3.2.1.3	c: Einfluss der Kochdauer bei 200 °C .....	30
3.2.1.4	d: Einfluss der Kochtemperatur bei einer Kochdauer von 4 min (Kiefer) .....	31
3.2.1.5	e: Einfluss der Kochtemperatur bei einer Kochdauer von 4 min (Buche).....	32
3.2.2	Einfluss des Stoffauslasses.....	33
3.2.3	Einfluss des Mahlscheibenabstandes .....	34
3.2.4	Einfluss der Holzart.....	35
3.2.5	Reproduzierbarkeit der Zerfaserungsbedingungen.....	37

<b>4</b>	<b>Industrierversuche</b>	<b>41</b>
4.1	Ausgangssituation im Werk Meppen	41
4.1.1	Steuerung der Faserstoffqualität	41
4.1.2	Beurteilung der Faserstoffqualität	43
4.2	Untersuchtes Faserstoffspektrum	44
4.3	Versuchsdesign	46
4.4	Charakterisierung der Faserstofftypen	46
4.5	Auswertung der aufgenommenen Prozessparameter mit Blick auf die beabsichtigte Herstellung verschiedener Faserplattentypen bzw. Faserstoffqualitäten	48
4.5.1	Hackschnitzelmix	48
4.5.2	Vorheiztemperatur und Kochparameter	49
4.5.3	Mahlscheibenabstand	50
4.5.3.1	Betrachtung über alle Faserstoffproben	50
4.5.3.2	Betrachtung einer zeitlich enggestaffelten Entnahmereihe von Faserstoffproben	50
4.6	Möglichkeiten der Prozesssteuerung über die Faserstoffqualität	53
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>57</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>58</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>59</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>61</b>

## Kurzzusammenfassung

**Projektbeschreibung:** Ungeachtet ihrer Bedeutung für den Produktionsprozess sowie die Eigenschaften der hergestellten Faserplatten wird die Qualität von thermo-mechanisch aufgeschlossenen Faserstoffen (engl.: thermo-mechanical pulp; kurz: TMP) vornehmlich über eine haptische und visuelle Begutachtung durch den Maschinenführer vorgenommen, da geeignete Messsysteme derzeit nicht verfügbar sind. Dieses Verfahren ist im hohen Maße von der prüfenden Person abhängig sowie das Ergebnis nur begrenzt quantifizierbar und daher für eine objektiv-gezielte Produkt- und Prozessoptimierung ungeeignet. Während im Rahmen von zwei Vorgängerprojekte Hard- und Software zur automatisierten Bildanalyse-basierten Vermessung von TMP entwickelt wurde, hatte das aktuelle Vorhaben die Untersuchung des Einflusses der Rohstoffheterogenität und der Produktionsbedingungen - insbesondere der Refiner-Parameter - auf die Faserstoffqualität sowie den Einfluss der Faserstoffqualität auf die Eigenschaften von Mitteldichten Faserplatten (engl.: medium-density fiberboard; kurz MDF) zum Ziel. Hierfür wurden zunächst Kenngrößen entwickelt, mit denen die Qualität von Faserstoffen beschrieben werden können. Anschließend wurden verschiedene Faserstoffe erzeugt, mit dem zuvor entwickelten Messgerät charakterisiert und die erzielten Ergebnisse mit den Prozessparametern der Faserstoffherzeugung sowie den mechanisch-technologischen Eigenschaften der aus diesen Faserstoffen hergestellten MDF in Zusammenhang gestellt. Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse wurden während der Aufstellung der Messgerätes in der Produktion eines MDF-Herstellers unter industriellen Bedingungen überprüft.

**Projektergebnisse:** Die Nutzung des in zwei Vorgängerprojekten entwickelten Messgerätes demonstriert die erfolgreiche Realisierung einer automatisierten Vereinzelung wollig-verfilzter MDF-Fasern sowie deren bildanalysebasierter Vermessung in größerer Anzahl (0,8 Mio. Fasern je Messung). Anhand der im Vorhaben entwickelten Kenngrößen zur Faserstoff-Charakterisierung sowie Qualitätsquantifizierung lassen sich Anlage und Prozess zur Faserstoffherzeugung gezielt optimieren ohne auf subjektive Urteile der Faserstoffbegutachtung angewiesen zu sein. Auf Basis der Ergebnisse von Labor- und Industrieversuchen konnten verschiedene Zusammenhänge von Prozessparametern und Faserstoffqualität bestätigt und erstmals anhand von Messwerten quantifiziert werden. Beispielsweise wurde der Mahlscheibenabstand (MSA) als eine wesentliche Einflussgröße auf die Faserstoffqualität dokumentiert: mit zunehmendem MSA nimmt die mittlere Faserlänge sowie der Grobanteil zu, während die Faseranzahl je mg Faserstoff abnimmt. Über die graphische Darstellung der Faserlängenverteilung lassen sich Faserstoffe aus verschiedenen Holzarten (Kiefer, Buche, Birke, Pappel) deutlich voneinander unterscheiden. Die gezielte Veränderung der Faserstoffqualität mit der Absicht einer Produktumstellung in der industriellen Produktion konnte anhand der Faservermessung klar nachvollzogen werden. Entgegen der anfänglich vermuteten Bedeutung der Faserstoffqualität als Indikator für die resultierenden Faserplatteneigenschaften, scheint die Bestimmung der Faserstoffzusammensetzung vielmehr Anwendung im Bereich des Prozessverständnisses und der Prozessoptimierung zu finden.

**Keywords:** MDF, Holzfasern, Faserplatte, Faseranalytik, Größenverteilung.

## Abstract

**Project description:** Despite its importance for the production process and properties of fiberboard, the quality of thermo-mechanical pulp (TMP) is principally determined with a haptic and visual inspection by skilled personnel, as adequate measurement systems are currently not available. This approach depends greatly on the person testing the material, and the results obtained are only quantifiable to a limited extent. Results are therefore unsuitable for objective product and process optimization. While the hardware and software of the automated image-based fiber analysis system applied were developed in the context of two previous projects, the current project aimed to investigate the influence of fiber composition and process parameters, particularly the refining parameters, on the fiber quality and the impact of the fiber quality on the properties of medium-density fiberboard (MDF). With this objective, characteristic values have been developed in order to quantify the fiber quality. Various fibers were produced and characterized. The obtained results were correlated with the parameters of the fiber production process as well as the mechanical properties of MDF made from these fibers. The scientific-technical results were verified in industrial trials when the measuring device was installed in the production process of an MDF manufacturer.

**Project results:** The application of measuring device developed in two previous projects demonstrates the successful realization of automated woolly-felted MDF fiber separation, as well as its image analysis-based characterization at greater amounts (0.8 mio. fibers per measurement). Based on the developed characteristic values for fiber characterization and quantification of the quality during this project, the defibration process can be optimized without having to rely on subjective results of fiber mat inspection. Based on the results of laboratory and industrial experiments, various interrelations of process parameters and fiber quality could be confirmed and quantified on the basis of measured values first. For example, the grinding gap distance (GGD) has been documented as a major determinant of fiber quality: with increasing GGD the average fiber length and the coarse particle fraction increase, while the number of fibers per mg of fibers decreases. Further on, fibers made from different types of wood (pine, beech, birch, poplar) were found to be significantly different in terms of fiber size distribution when charted graphically. The intentional modification of fiber quality for product conversion in industrial production could be clearly traced through fiber measurement. In contrast to the initially presumed importance of fiber quality as an indicator for fiberboard properties, fiber characterization was found to be of much more interest in order to understand and optimize the defibration process.

**Keywords:** MDF, wood fibers, fiberboard, fiber analytics, fiber size characterization.

## 1 Einleitung

### 1.1 Wirtschaftliche Bedeutung von MDF

Mit einem Anteil von 23 % (11,7 mio m<sup>3</sup>) an der europäischen Holzwerkstoffproduktion (51,1 mio m<sup>3</sup>) in 2010 (ohne Russland und Türkei), ist MDF (Mitteldichte Faserplatte; engl.: medium-density fiberboard) der zweitwichtigste Holzwerkstoff nach Spanplatte (Döry, 2012). Das weltweite Produktionsvolumen von MDF betrug 70 Millionen m<sup>3</sup> im Jahr 2010 (FAO, 2010).

### 1.2 MDF-Herstellung und Faserstoffqualität

Die wesentliche Rohstoffkomponente zur Herstellung von MDF - thermo-mechanisch aufgeschlossener Holzfaserstoff (engl.: thermo mechanical pulp; kurz: TMP) - wird als Ergebnis der Zerfaserung von Hackschnitzeln oder Sägespänen in einem Refiner erhalten. Vor dem mechanischen Aufschluss des Holzes im Refiner wird zunächst die Holz-Matrixsubstanz Lignin in einem Kocher erweicht. Aufgrund der konzentrierten Lokalisierung von Lignin zwischen den einzelnen Zellen im Holz (Mittellamelle), stellt das erweichte Lignin eine Sollbruchstelle dar und fördert im erweichten Zustand so die anschließende Zerfaserung der Holzsubstanz in Einzelfasern. Neben der gezielten Durchwärmung der Hackschnitzel über die Parameter Kochdauer und -temperatur, ist ein enger Zusammenhang von Mahlscheibenabstand und Faserstoffqualität zu beobachten. Die Wahl kleiner Mahlscheibenabstände führt zu feinen Faserstoffen, die Wahl großer Mahlscheibenabstände führt zu groben Faserstoffen. Dieser Zusammenhang lässt sich am Energiebedarf des Refiners nachvollziehen: eine intensive Aufspaltung der Holzsubstanz in seine Strukturelemente fordert einen größeren Energieeinsatz. Die Qualität des Faserstoffes wird folglich von den Parametern des Zerfaserungsprozesses bestimmt.

Im Anschluss an den Zerfaserungsprozess wird der erzeugte Faserstoff in der Blasleitung (engl.: blow-line) beleimt und anschließend getrocknet sowie weiter in der Heißpresse zu Faserplatten verpresst. Die Eigenschaften der erzeugten Faserplatten sind im hohen Maße rohdichteabhängig, werden aber auch von der Gestaltung des Heißpressprozesses (Presstemperatur und -dauer), der Chemikaliengabe (Bindemittel- und Hydrophobierungsmittelart sowie deren Anteile) sowie entscheidend von der Faserstoffqualität bestimmt (Deppe und Ernst, 1996; Deppe, 2003). Über die Gestaltung des Heißpressvorgangs kann das Rohdichteprofil und somit unter anderem die Biegeeigenschaften der Faserplatte beeinflusst werden, während über die eingesetzte Menge und die Art des Bindemittels die Anforderungen an beispielsweise die Feuchtigkeitsbeständigkeit gesteuert werden.

Die Faserstoffqualität hat Einfluss auf den Pressprozess (z.B. Entlüftungsgeschwindigkeit des Faserkuchens) sowie die Eigenschaften der Faserplatten. Beispielsweise wird Klebharz vom Staubanteil gebunden, sodass dieses nicht mehr zur Festigkeit der Faserplatte beitragen kann. Weiter sind bestimmte Faserstoffqualitäten zur Herstellung bestimmter Plattenqualitäten erforderlich. Feine Faserstoffe werden benötigt, um Tieffräsqualitäten (engl.: deep router grade MDF) herzustellen, während grobe Faserstoffe benötigt werden, um geringe Schüttdichten auf der Formstraße zu erreichen, die für die Herstellung von Faserdämmplatten (engl.: wood fiber insulation board; kurz: WFIB) notwendig sind. Die Herstellung von MDF für die Direktlackierung oder den Möbelbau (engl.: direct laquering or furniture grade MDF) wird TMP mit einem niedrigen Shive-Anteil und entsprechend homogener Plattenoberfläche benötigt (EUWID, 2013).

### 1.3 Bestimmung der Faserstoffqualität

Ungeachtet ihrer Bedeutung bei der Herstellung von Faserplatten, wird die Faserstoffqualität derzeit lediglich auf einem technisch niedrigen Niveau erfasst. Zu diesem Ergebnis kam eine weltweite Befragung unter den MDF-Produktionsstandorten, die im Rahmen des Vorgängerprojektes Fiber-View durchgeführt und April 2013 auf dem International Wood Composites Symposium (IWCS) in Seattle, Washington/USA, vorgestellt wurde (Benthien et al., 2013a). Hiernach wird in Ermangelung geeigneter Messinstrumente die Faserstoffqualität überwiegend haptisch und visuell durch die jeweiligen Maschinenführer beurteilt. Darüber hinaus finden adaptierte Siebtechniken aus der Spanplattenherstellung Anwendung. Diese Methoden (inklusive Luftstrahlsiebung) lassen sich für die Charakterisierung von Faserstoffen jedoch nicht zielführend einsetzen, da mit ihnen lediglich die Faserbreite bestimmt werden kann (Wenderdel und Krug, 2012). Weiter findet der Vergleich von erzielten Plattenqualitäten mit Rückstellmustern sowie eine auf Schüttdichte und Mattenhöhe basierte Qualitätsbeurteilung Anwendung. Bildanalysebasierte Messgeräte aus der Zellstoff- und Papierindustrie konnten sich laut der oben genannten Umfrageergebnisse bisher nicht zur Charakterisierung von TMP etablieren.

Das Problem von bildanalysebasierten Messgeräten aus der Zellstoff- und Papierindustrie ist, dass diese das enorme Größenspektrum – von Staub und Faserfragmenten über Einzelfasern bis hin zu Faserbündeln – nicht abdecken können. Insbesondere grobe Partikel und Faserbündel (Shives) neigen zum Verstopfen der Flusszelle, wie eigene Versuche an einem FiberLab/ Kajaani (Metso Automation INC, Helsinki, Finnland) zeigten. Im Fall der Anpassung der Flusszelle beim PulpVision (Andritz) an das breitere Fasergrößenspektrum von TMP wie es von Funk (2013) untersucht wurde, ist von unscharfen Faserabbildungen auszugehen, da die Kamera nur auf einen begrenzten Bereich fokussiert werden kann.

Wie auch die auf wässrigen Fasersuspensionen und rechnergestützten bildanalysebasierenden Messsysteme, stoßen auch trocken-bildanalytisch arbeitende Messsysteme bei der Charakterisierung von TMP an ihre Grenzen: Insbesondere die Notwendigkeit die Fasern vor der Bildaufnahme zeitaufwendig händisch zu vereinzeln und die Aufnahmen von überkreuzt-liegende Fasern zu

verwerfen, lassen das Potential von ansonsten vielversprechende Messsysteme wie dem FibreShape (IST - Innovative Sintering Technologies Ltd., Vilters, Schweiz) und dem QIC-PIC (Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld, Deutschland) letztendlich als begrenzt erscheinen. Abgesehen von der für Fasern ungeeigneten Separierung vor der Bildakquise über eine Rüttelrinne, kommt beispielsweise im Fall des Camsizers (Retsch, Haan, Deutschland) die Ausrichtung des Vermessungsalgorithmus auf kubische Partikel hinzu, was die Eignung für die Vermessung von Fasern weiter reduziert. Aussichtsreich für die Prozesskontrolle auf Basis bildanalytischer Faservermessung erscheint das kürzlich von GreCon in den Markt eingeführte FiberView System. Dieses vom Thünen-Institut für Holzforschung, KOGS und Grecon entwickelte System umgeht die Vereinzelung von Fasern und detektiert anstelle des gesamten Faserstoffspektrums lediglich die für die spätere Verarbeitung der Platten störenden Shives an der Fasermattenoberfläche zwischen Vor- und Heißpresse.

## 1.4 Bisherige Arbeiten zur Faservermessung

Mit dem Ziel, Schwächen derzeit verfügbarer Messsysteme zu überwinden, begannen im Jahr 2009 die Universität Hamburg (Hamburg, Deutschland), speziell das Zentrum Holzwirtschaft sowie der Arbeitsbereich Kognitive Systeme (KOGS), und das Unternehmen Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG (GreCon) (Alfeld, Deutschland), eine Software zur bildanalytischen Qualitätskontrolle von Holzfasern für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten zu entwickeln (FiberVision). Im Rahmen eines Folgeprojektes (Fiber-View) wurde ab 2010 an der Konzipierung, Entwicklung und Erprobung eines Bildanalysesystems zur Erkennung von groben Faserelementen während des Herstellungsprozesses von MDF gearbeitet. Ergebnisse dieser Forschungsvorhaben waren ein bildanalysebasiertes System zur Erkennung von Shives an der Oberfläche von Faserplatten (Inline Fasercharakterisierung), eine Software zur separaten Vermessung von überkreuzt liegenden Fasern sowie eine Technik zur Faservereinzelung, die für eine weitestgehend automatisierte, bildanalysebasierte Offline-Faserstoffcharakterisierung richtungsweisend ist und zum Patent angemeldet wurde. Das Gerät zur Inline Fasercharakterisierung wurde inzwischen von kommerziell umgesetzt (FiberView System) und in drei deutschen MDF-Werken installiert (Hasener 2013a, b). Das Gerät zur Offline Fasercharakterisierung wurde zu Beginn des aktuellen Vorhabens so finalisiert (Anpassungen an Hard- und Software, Datenauswertung), sodass ein uneingeschränkter Einsatz in Labor und Industrie möglich ist.

## 1.5 Ziel des Projektes

Ziel des Projektes war die Untersuchung des Einflusses der Parameter des Refinerprozesses auf die Faserstoffqualität und weiter der Faserstoffqualität auf die resultierenden Platteneigenschaften. Hierfür wurden in einem ersten Schritt im Labor unter Anwendung verschiedener Kocher- und Refinereinstellungen aus unterschiedlichen Holzarten Faserstoffe hergestellt, vermessen, zu Prüfplatten verarbeitet und deren Eigenschaften bestimmt. In einem zweiten Schritt wurde das in

Vorgängerprojekten entwickelte Faserlängenmessgerät in einem MDF-Werk aufgestellt und hier Faserproben aus dem laufendem Betrieb charakterisiert und deren Zusammenhang mit den jeweiligen Prozessparametern betrachtet. Neben letzten Hardware-Anpassungen war die Findung einer geeigneten Handhabung und Auswertung der erzeugten Daten Aufgabe dieses Projektes.

## 2 Offline-Fasercharakterisierung

Für die im vorliegendem Abschlussbericht dargestellten Forschungsarbeiten wurde die Faserstoffcharakterisierung mit einem Gerät durchgeführt, das im Wesentlichen im Rahmen von zwei Vorgängerprojekten der Partner Thünen-Institut für Holzforschung, Zentrum Holzwirtschaft, KOGS und GreCon konstruiert und entwickelt wurde. Hierbei wurde im Projekt „Fiber-Vision“ zunächst eine Bildanalysesoftware entwickelt, die neben der subpixel-genauen Vermessung auch mangelhaft-vereinzelte Fasern bildanalytisch trennen und somit einzeln vermessen kann. Im Rahmen des Nachfolgeprojektes „Fiber-View“ wurde, parallel zur Entwicklung eines Inline-Messgerätes zur Shive-Erkennung<sup>1</sup>, die Hardware des hier verwendeten Offline-Fasermessgerätes entwickelt. Neben letzten Hardware-Anpassungen lag der Fokus der Entwicklungsarbeit im aktuellen Projekt („Fiber-Impact“) auf der Handhabung der erzeugten Daten, deren Auswertung sowie der Untersuchung des Einflusses der Parameter des Refinerprozesses auf die Faserstoffqualität und weiter der Faserstoffqualität auf die resultierenden Platteneigenschaften.

Das Messgerät arbeitet auf Basis trocken-gestreuter Fasern, die nach der mechanischen Vereinzelung mit Hilfe einer Kamera optisch erfasst werden. Im Anschluss an die Bildakquise analysiert ein Software-Algorithmus das erzeugte Graustufenbild und vermisst die erkannten Objekte. In einem weiteren Schritt werden die erzeugten Messdaten verarbeitet, d.h. geeignete Kennzahlen und Grafiken erstellt, anhand derer der untersuchte Faserstoff charakterisiert werden kann. Entsprechend dieser Arbeitsschritte ist die nachfolgende Beschreibung Offline-Fasercharakterisierung in vier Abschnitte unterteilt: Hardware, Software, Datenauswertung und Erläuterung der verwendeten Kennzahlen.

Die Methode zur Faservereinzelung wurde zum Patent angemeldet. Die Offenlegung der Patentschrift wird im September dieses Jahres erfolgen. Die deutsche Patentanmeldung hat die Patentnummer: 10 2013 003 636.4. Der Titel der Patentanmeldung lautet: „Verfahren und Vorrichtung zum Vermessen von Partikeln, insbesondere von Fasern, hinsichtlich Ihrer Größe.“

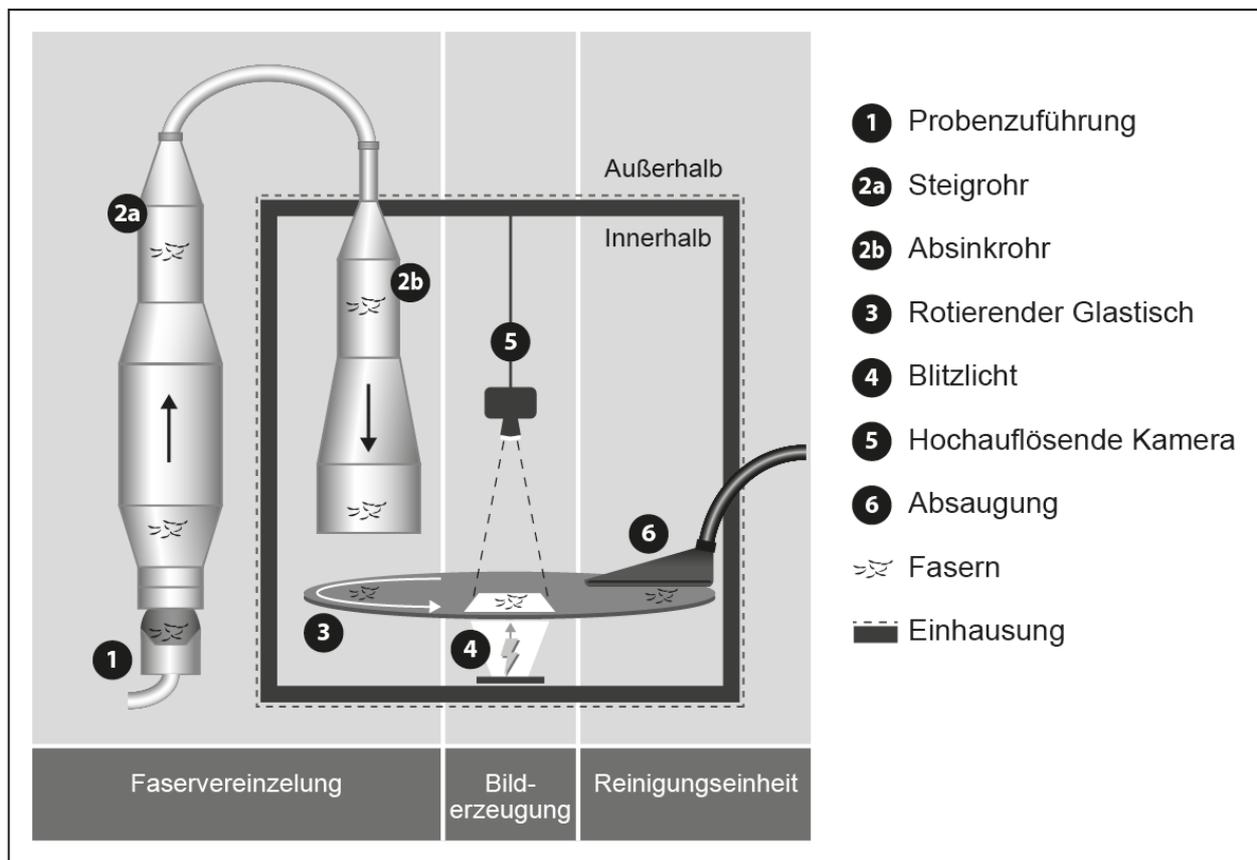
---

<sup>1</sup> Das Gerät wird inzwischen von GreCon unter dem Produktnamen FiberView vertrieben und ist bereits in drei deutschen MDF-Werken erfolgreich im Einsatz.

## 2.1 Das Messgerät: Hardware und Steuerungs-Software

### 2.1.1 Aufbau des Messgerätes

Der technische Aufbau des entwickelten Fasermessgerätes ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt und lässt sich in drei funktionelle Bereiche unterteilen: (I) die Faservereinzelung, (II) die Bildakquise und (III) die Reinigungseinheit. In der Faservereinzelungseinheit wird eine Faserstoffprobe von ca. 0,5 g über die Probenzufuhrvorrichtung (1) in die untere Öffnung des Steigrohres (2a) eingebracht. Die mechanische Faservereinzelung sowie der Transport der vereinzelt Fasern durch das Rohrsystem erfolgt mit Druckluft. Während des Transportes der Fasern durch das Rohrsystem wird die Faservereinzelung durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund unterschiedlicher Durchmesser des Rohrsystems unterstützt. Mit Erreichen des Absinkrohres (2b) wird die Strömungsgeschwindigkeit reduziert und die vereinzelt Fasern werden auf dem rotierenden Glastisch (3) abgelegt. Über die Drehbewegung des Glastisches werden die Fasern kontinuierlich der Bilderzeugungseinheit zugeführt, die aus einem Blitzlicht (4) und einer hochauflösenden Kamera (5) besteht. Die Bildakquise erfolgt im Durchlichtverfahren. Mit einer Frequenz von etwa 70 Bildern pro Minute werden die Fasern fotografiert, sodass je Messdurchgang etwa 560 Bilder erzeugt werden. In der Regel werden je Faserstoff-Charakterisierung drei Wiederholungsmessungen durchgeführt, sodass insgesamt ca. 1,5 g Faserstoff vermessen und 1.680 Bilder erzeugt werden. In der Reinigungseinheit werden die Fasern über eine Absaugung (6) von der Glasscheibe entfernt.



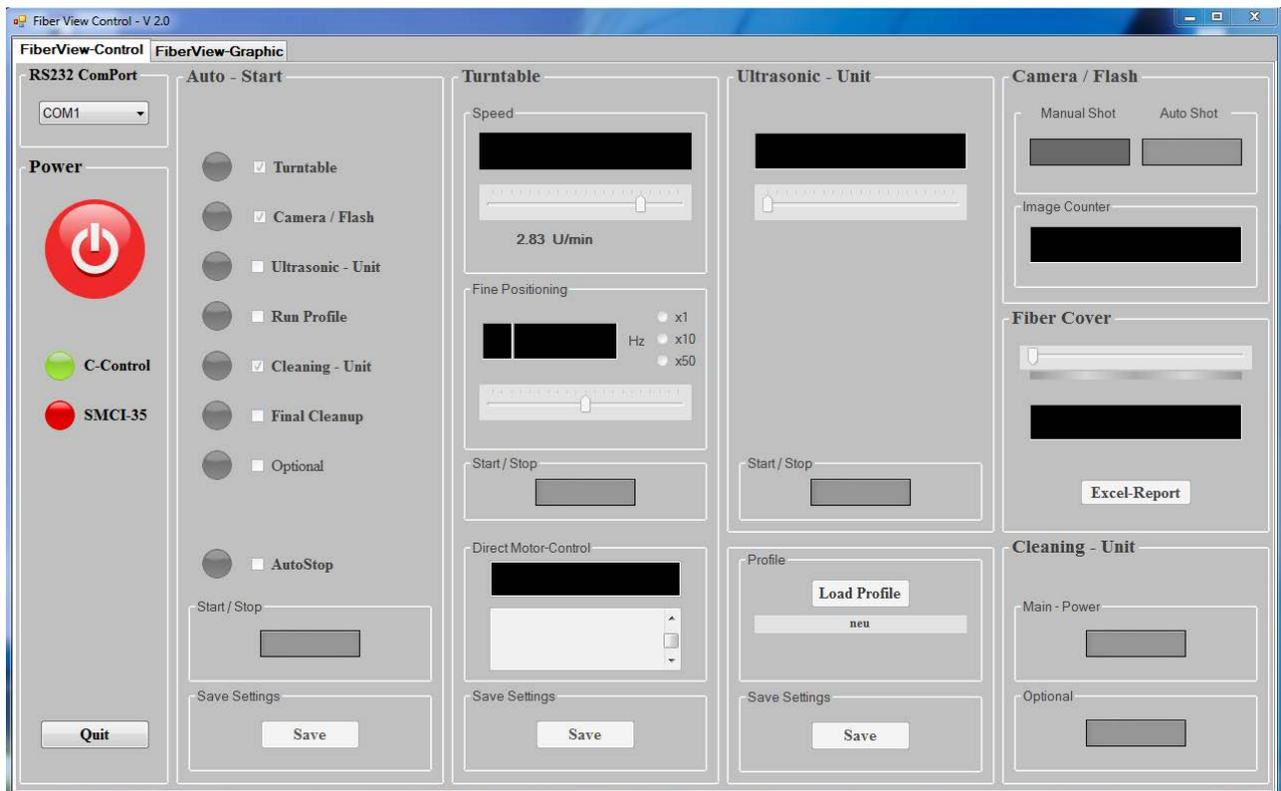
**Abbildung 1:** Schemazeichnung des Fasermessgerätes

Das Zusammenspiel der Hardware-Komponenten Schrittmotor (Antrieb Glastisch), Blitzlicht und Kamera, die Menge der Druckluft (Volumenstrom) sowie die Stromzufuhr für die Absaugung werden über zwei Mikrocontroller geregelt. Hierbei deckt der Controller *SMCI-35* (Nanotec Electronic GmbH & Co. KG, Landsham, Deutschland) die Steuerung des Schrittmotors und der Controller *C-Control* (Conrad Electronic SE, Hirschau, Deutschland) die Steuerung der übrigen Hardware-Komponenten ab. Die Controller kommunizieren mit dem Dialogfenster (kurz: GUI; engl.: graphical user interface) der vom Thünen-Institut für Holzforschung entwickelten Software *Fiber View Control - V 2.0*.

### 2.1.2 Hardware-Steuerungssoftware

Die Steuerung der Kamera erfolgt über die „Common Vision Blox Management Console“ von Stemmer Imaging GmbH, Puchheim, Deutschland. Über diese Software wird die Kamera-Initialisierung vorgenommen, d.h. beispielsweise die Art von Trigger-Signal definiert, über die die Kamera ausgelöst wird, sowie die Bildaufnahmeparameter festgelegt.

Die hausintern entwickelte *Fiber View Control - V 2.0* Software steuert über die Controller *C-Control* und *SMCI-35* die Hardwarekomponenten (Druckluftventil, Blitzlicht, Kamera, Schrittmotor, Absaugung). Neben der individuellen Steuerung einer jeden Hardwarekomponente lassen sich hiermit auch verschiedene Routinen, wie beispielsweise vorab spezifizierte Druckluftprofile oder Reinigungsfahrten, definieren.



**Abbildung 2:** Dialogfenster der *Fiber View Control - V 2.0* Software

### 2.1.3 Kameradetails (Leistungsdaten): Optische Auflösung des Systems

Die optische Auflösung der verwendeten Kamera (GE4000)<sup>2</sup> wird vom Hersteller (Allied Vision Technologies GmbH (AVT), Stadtroda, Deutschland) mit 4008 x 2672 Pixel (nominal 11 Megapixel) angegeben. Zur Bestimmung des effektiv aufgenommenen Ausschnittes der Glasscheibe (Bildseitenverhältnis 1,5:1) sowie der Pixelkantenlänge, wurde ein Objektmikrometer (Objektmikrometer 3, POG Präzisionsoptik Gera GmbH, Gera, Deutschland) auf der Glasscheibe abgelegt und fotografiert. Es wurde ermittelt, dass 10 mm auf dem Objektmikrometer 430 Pixeln entsprechen. Hieraus folgt, dass die Kantenlänge der quadratischen Pixel 23,2  $\mu\text{m}$ , der fotografierte Ausschnitt der

<sup>2</sup> ausgestattet mit einem Kodak KAI-11002 CCD-Sensor

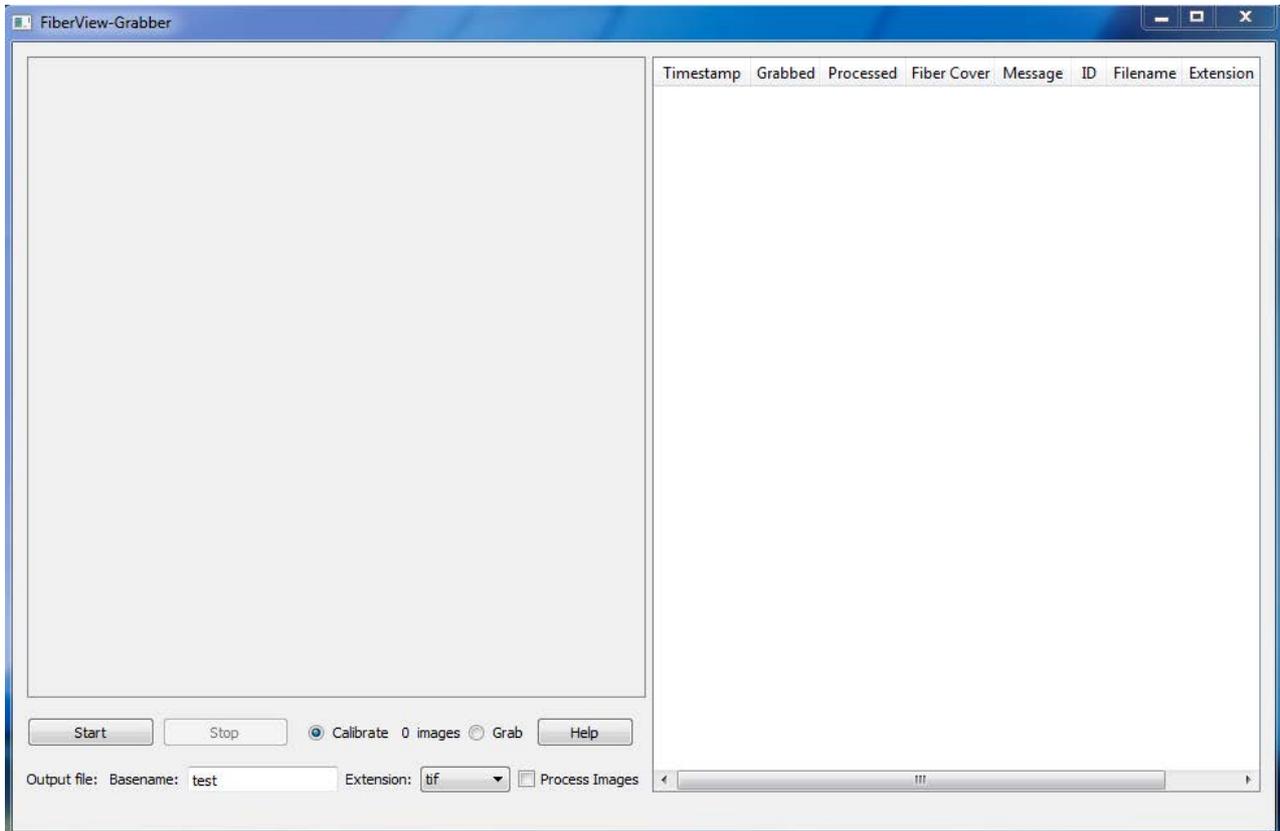
Glasscheibe ungefähr 93 mm x 62 mm und die Bildauflösung 1095 dpi (dots per inch; deut.: Punkte pro Inch) bzw. ppi (pixel per inch; deut.: Pixel pro Inch) beträgt.

Im Rahmen der Bildanalyse wird die Auflösung technisch erhöht bzw. die Faservermessung erfolgt losgelöst vom Pixelraster. Dies bedeutet, dass die Faservermessung subpixel-genau ist und auch Faserlängen gemessen werden können, die kein ganzzahliges Vielfaches von 23,2  $\mu\text{m}$  sind. Die Messgrenze bleibt hiervon jedoch unberührt und beträgt 46,4  $\mu\text{m}$  (2 Pixel).

## 2.2 Die Faservermessung: Bildakquise und -analyse

### 2.2.1 Grabber: Bildsammlung und -speicherung

Die im Betrieb des Messgerätes von der Kamera emittierten Bilder werden an den, dem Messgerät zugehörigen Computer übertragen und dort von einer Grabber-Software gesammelt und gespeichert. Der englische Begriff Grabber (Frame Grabber) kann mit „Bilddigitalisierer“ oder „Bildfangschaltung“ übersetzt werden. Wörtlich übersetzt handelt es sich um einen „Bild-Greifer“. Die Funktion der Software ergibt sich aus ihrer Bezeichnung. Parallel zur Bildsammlung durch den Grabber beginnt bereits die Bildanalyse durch die Segmenter-Software (siehe 2.2.2 Segmenter). Der Grabber kann ergänzend zum eben beschriebenen Fall auch so betrieben werden, dass zunächst die Bilder abgespeichert und erst zu einem späteren Zeitpunkt der Bildverarbeitung zugeführt werden („Dummy-Grabber“).



**Abbildung 3:** Dialogfenster der Grabber-Software

## 2.2.2 Segmenter: Bilderkennung und Faservermessung

Nach bzw. parallel zur Bildsammlung durch den Grabber führt die Segmenter-Software die Bildanalyse und Faservermessung durch. Wie auch im Fall des Grabbers beschreibt die Software-Bezeichnung auch hier die wesentliche Funktion: Jedes einzelne Bild wird segmentiert, d.h. es werden benachbarte Pixel oberhalb eines definierten Grau-Schwellwertes als zusammenhängend definiert und als Objekte erkannt. Die so detektierten Objekte werden nachfolgend vom Segmenter vermessen, d.h. Werte für Länge, Breite und Helligkeitsintensität bestimmt.

Der Faservermessung liegen zwei Vermessungsprinzipien zugrunde, die sequenziell gestaffelt zur Anwendung kommen: In einem ersten Schritt wird versucht die Längen- und Faserbreitenvermessung der jeweiligen Faser über die sogenannte *Faserverfolgungsmethode* zu realisieren. Kann diese Methode für das detektierte Objekt nicht angewendet werden, so kommt die *Momente-Methode* zum Einsatz. Aufgrund der Arbeitsweisen beider Algorithmen muss mit Blick auf die Messgrenze des Systems bei der späteren Auswertung keine Datenauswahl mehr erfolgen, da Objekte erst ab einer Minimalgröße von 2 Pixel verarbeitet werden.

Die Faservermessung erfolgt subpixelgenau, losgelöst vom Pixelgitter, sodass die Dimensionsangaben nicht auf Pixelschritte begrenzt sind und auch Längen zwischen 24 und 47  $\mu\text{m}$  (1 bis 2 Pi-

xel) gemessen werden können. Im Fall der *Faserverfolgungsmethode* wird dies durch die Umstellung von der pixelbasierten auf die kontinuierliche Darstellung des Graustufenbildes erreicht. Bei Anwendung der *Momente-Methode* sind die Ergebnisse ebenfalls subpixel-genau, da bei der Berechnung (Bild-) Momente bestimmt und gewichtete Mittelwerte aus den Graustufen der einzelnen Pixel des Objektes gebildet werden.

Für die Charakterisierung von Faserstoffen auf Basis der Eigenschaften individueller Fasern<sup>3</sup> (Länge, Breite, Helligkeitsintensität) im Allgemeinen sowie für die automatisierte bildanalyse-basierte Faservermessung im Besonderen ist Voraussetzung, dass die zu vermessenen Objekte als Einzelfasern vorliegen bzw. als solche erkannt werden können. Diese Voraussetzung wird von der zuvor beschriebenen Messgerät-Hardware überdurchschnittlich umfassend erzielt, wobei selbst hier, trotz intensiver Vereinzelnung und gleichzeitig geringem Bedeckungsgrad (optimal 2%) des Objektträgers (rotierende Glasscheibe, (3) in Abbildung 1), Fasern überlappend abgelegt sind. Mit dem Ziel, derartige Objekte nicht von der Vermessung ausschließen zu müssen oder fehlerhafte Messergebnisse bei Anwendung im Bereich der Faservermessung gängiger Messverfahren (Feret-Länge, Mittellinienskelettierung, Rechteckmodell) hinnehmen zu müssen, kommt im Rahmen der *Faserverfolgungsmethode* eine software-basierte Separierung von eng-parallel und überkreuzt liegenden Einzelfasern zum Einsatz.

Die Charakterisierung einer Faserstoffprobe setzt sich aus drei Wiederholungsmessungen zusammen, in deren Rahmen ca. 560 Bilder erzeugt werden. Ein jedes Bild wird vom Segmenter verarbeitet und die Ergebnisse der Faservermessung in Form einer csv<sup>4</sup>-Datei ausgegeben. Nach der Faservermessung liegen je Wiederholungsmessung 560 csv-Dateien bzw. je Faserstoff-Charakterisierung 1680 csv-Dateien vor. Deren weitere Verarbeitung erfolgt über eine MATLAB-Routine, die in Kapitel 2.3 näher beschrieben wird.

Die in den folgenden Unterkapiteln gegebenen Ausführungen richten sich an Informatik-Laien bzw. Bildverarbeitungseinsteiger und sollen diesen ein grundsätzliches Verständnis der Funktionsweise und der internen Abläufe der Faservermessungssoftware liefern. Eine detailliertere Beschreibung des Faserverfolgungsalgorithmus ist bei Benthien et al. (2014) zu finden.

---

<sup>3</sup> Im Kontext der Faserplattenherstellung ist unter dem Begriff „Faser“ nicht zwangsläufig eine Holzzelle im biologisch-anatomischen Sinne (Tracheide, Gefäßzelle, Librifaser oder andere) zu verstehen, sondern vielmehr ein einzelner Partikel, der zur Herstellung von Faserplatten verwendet wird. Eingeschlossen sind auch Faserfragmente (Staub) sowie unvollständig aufgeschlossene Faserbündel (Shives).

<sup>4</sup> steht für englisch comma-separated values (deut.: komma-getrennte Werte)

### 2.2.2.1 Bildvorverarbeitung

**Kalibrierung:** Mit dem Ziel einen möglichen Einfluss von ggf. anhaftenden Schutzpartikeln bzw. Kratzer auf der rotierenden Glasscheibe zu eliminieren sowie einer möglicherweise auftretenden inhomogenen Ausleuchtung des Blitzlichtes entgegen zu wirken, wird ein jedes der aufgenommenen Bilder über ein vor der Bildaufnahme aus ungefähr 160 Leeraufnahmen erzeugtes Bild kalibriert.

**Schwellwert:** Im Anschluss an die Kalibrierung wird ein jedes Bild über ein Graustufen-Schwellwertverfahren dahingegen bearbeitet, das unterhalb des definierten Grauwertes liegende Pixel dem Hintergrund (weiß) zugeordnet und nicht für die Faservermessung berücksichtigt werden.

**Segmentierung:** Das so vorbereitete Bild wird nun segmentiert, d.h. in Regionen von Interesse (engl.: region of interest; kurz: ROI) unterteilt. Hierfür werden zunächst benachbarte Pixel (Nicht-Hintergrund) als zusammenhängend definiert und einem jeden so detektierten Objekt eine individuellen ROI zugeordnet. Innerhalb der nachfolgenden Fasererkennung spart dieser Arbeitsschritt Prozessor-Leistung, da nun nicht mehr das ganze Bild, sondern nur noch Bildausschnitte betrachtet und analysiert werden müssen, in denen tatsächlich Objekte gefunden wurden. Das Ausmaß dieser Ersparnis wird deutlich, wenn berücksichtigt wird, dass der (Faser-) Bedeckungsgrad der Bilder lediglich 2 % beträgt. Wichtig zu erwähnen ist hier, dass die Anzahl an ROIs nicht zwangsläufig mit der Anzahl an Fasern übereinstimmen muss, da innerhalb einer ROI mehrere Fasern gefunden werden können. Dies ist dann der Fall, wenn überlappend liegende Fasern vorhanden sind. Eine ROI wird dann von der Faservermessung ausgeschlossen, wenn die Region an den Bildrand angrenzt, d.h. ein Objekt detektiert wurde, dass bei der Bildaufnahme nicht vollständig erfasst wurde.

### 2.2.2.2 Faservermessung

**Faserverfolgungsmethode:** Für das Verständnis des Messprinzips „Faserverfolgung“ (engl.: flow-line tracing) ist es hilfreich, sich die erfassten Bilder der gestreuten Fasern als Reliefkarte vorzustellen, wobei hier die dunklen Bildpunkte die Erhebungen in einer Berglandschaft und die hellen Punkte die flache Umgebung darstellen. Fasern können somit als Berge in einer ansonsten flachen Landschaft verstanden werden. Mit dieser Modelvorstellung kann der Prozess der Faservermessung und software-basierte Separierung als Wanderung auf einem Bergrücken - von Gipfel zu Gipfel - verstanden werden. Das Ergebnis dieses Prozesses ist ein Netzwerk von Wegstrecken, wobei ein jeder die Skelettlinie einer Faser repräsentiert. Auf Basis dieser Skelettlinie werden die Fasereigenschaften bestimmt (Länge, Breite, Helligkeitsintensität) sowie überlappend liegende Fasern voneinander separiert. Die Faserbreitenmessung erfolgt an bestimmten charakteristischen Punkten der Skelettlinie, sodass in der Ergebnisdatei ein Mittelwert mit Standardabweichung angegeben wird. Gleiches gilt für die Bestimmung der Helligkeitsintensität.

**Momente-Methode:** Im Fall sehr kleiner Objekte kann die *Faserverfolgungsmethode* gelegentlich nicht angewendet werden, da bestimmte erforderliche Kenngrößen (Sattelpunkte, Extrema) nicht gefunden werden können. In diesem Fall wird über die Berechnung der (Bild-) Momente (engl.: image moments) eine Ellipse an das detektierte Objekt angepasst und über deren Eigenschaften (Länge der kleinsten und größte Achse) die Faserlänge und die Faserbreite bestimmt.

### 2.2.2.3 Software-basierte Faserseparierung

Jedes in einer ROI detektierte Objekt stellt entweder eine einzelne MDF-Faser oder ein Konglomerat aus mehreren nicht vereinzelt Fasern dar, die vor der Vermessung über einen Nachbearbeitungsschritt (Software-Algorithmus) voneinander separiert werden müssen. Für diese Separierung wird an einem jeden Endpunkt einer Verfolgungslinie damit begonnen, die Skelettlinie bis zu einem Knotenpunkt zu verfolgen. Die Verfolgung einer Skelettlinie über den Knotenpunkt hinaus erfolgt auf dem Weg, der so gerade wie möglich ist. Entsprechend der Charakteristika eines Knotenpunktes (Anzahl der Seitenarme sowie Winkel zwischen Seitenarm und durchgehender Skelettlinie) wird entschieden, ob es sich um eine Verzweigung der vornehmlich verfolgten Faser handelt oder eine überkreuzt liegende weitere Faser vorliegt, die separiert werden muss.

## 2.3 Die MatLab-Routine: Datenauswertung und Ergebnisdarstellung

### 2.3.1 Problemstellung und Lösungsweg

Als Ergebnis der Faservermessung liefert die Segmenter-Software je Wiederholungsmessung ca. 530 csv-Dateien, in denen Messgrößen wie Länge, Breite und Helligkeitsintensität tabellarisch aufgeführt sind. Da der Umfang der Daten die Auswertung mit einem gängigen Tabellenkalkulationsprogramm wie z.B. Microsoft Excel unmöglich macht, wurde unter MATLAB (MathWorks, Natick, Massachusetts, USA) ein „Skript“ programmiert, das die gesamte Datenhandhabung, ausgehend vom Segmenter-Output bis hin zur Ausgabe eines Fasersteckbriefes (Ergebnisprotokoll), abdeckt. Der Fasersteckbrief (engl.: *Fiber Fact Sheet*) setzt sich aus verschiedenen Kennwerten und der graphischen Darstellung der doppelt-längengewichtete relative Häufigkeitsverteilung in Form eines geglätteten Häufigkeitspolygon sowie eines Box-Whisker-Plots (deut.: Kasten-Schnurrhaar-Grafik) auf Basis der doppelt-längengewichteten relativen Summenhäufigkeitsverteilung zusammen. Ergänzend zum Fasersteckbrief, der die untersuchte Faserstoffprobe über Mittelwert und Streuung (Standardabweichung und Variationskoeffizient) der drei Wiederholungsmessungen charakterisiert, wird eine Datei erstellt, in der die ermittelten Kennwerte für jede Wiederholungsmessung zusammengestellt sind. Diese Tabelle kann für den Vergleich von Faserstoffen auf Basis statistischer Tests herangezogen werden.

### 2.3.2 Komplettierung der Basisdaten

Mit dem Ziel, über die Bearbeitung des Segmenter-Outputs mit der MATLAB-Routine einen umfassenden und vollständigen Datensatz zu erhalten, wurde der Programmcode so gestaltet, dass über eine Eingabemaske auch alle die Informationen zu einer Faservermessung abgefragt und dokumentiert werden, die sich nicht aus den Ergebnissen der Bildanalyse generieren lassen. Hierfür wird zur Benennung des Messprojektes, dem Ursprung der Faserstoffprobe (z.B. Name des MDF-Werkes), des Namens der für die Analyse verantwortlichen Person sowie dem Datum der Probeentnahme aufgefordert. Weiter wird die Einwaage einer jeden Wiederholungsmessung abgefragt. Das Datum der Faservermessung sowie die Anzahl der Wiederholungsmessungen werden automatisch ergänzt.

### 2.3.3 Datenkomprimierung und deren Ausgabeformat

Über die Bearbeitung des Segmenter-Outputs mit der MatLab-Routine werden die nach der Faservermessung in ca. 560 bzw. 1680 einzelnen csv-Dateien verteilten Messdaten in 5 Dateien komprimiert zusammengefasst und somit sinnvoll handhabbar archiviert:

- Fasersteckbrief (pdf-Datei)
- Auflistung für Statistik (xls-Datei)
- Grafik 1: Doppelt-längengewichtete relative Häufigkeitsverteilung (bmp-Datei)
- Grafik 2: Box-Whisker-Plot (bmp-Datei)
- Rohdaten (mat-Datei)

**Fasersteckbrief:** Der Fasersteckbrief ist das zentrale Ergebnisprotokoll, mit dem der untersuchte Faserstoff umfassend charakterisiert wird. Eingebettet hierin sind Grafik 1 und 2. Eine detaillierte Erläuterung der im Steckbrief angegebenen Kennwerte sowie deren Berechnungswege erfolgt in Kapitel 2.4.

**Auflistung für Statistik:** In der Datei „Auflistung für Statistik“ werden die ermittelten Kennwerte für jede Wiederholungsmessung aufgelistet, um diese so für einen Vergleich von Faserstoffen auf Basis statistischer Tests heranziehen zu können.

**Grafik 1 und Grafik 2** werden zusätzlich zum Steckbrief separat gespeichert, um so im Fall der Verwendung für ergänzende Ergebnispräsentationen hierauf einen einfachen Zugriff zu haben. Eine detaillierte Erläuterung der zugrundeliegenden Berechnungsoperationen wird in Kapitel 2.4 vorgenommen.

**Rohdaten:** Die Speicherung der Rohdaten als mat-Datei sorgt für deren platzsparende Archivierung unter Aufrechterhaltung der zügigen Zugreifbarkeit mit MatLab.

## 2.4 Der Fasersteckbrief: Erläuterung der Kennwerte und deren Berechnungswege

Als Datengrundlage für die mit der MatLab-Routine aus den Rohdatensätzen der drei Wiederholungsmessungen kalkulierten Kennwerte sowie den graphischen Darstellungen (geglättetes Häufigkeitspolygon, Box-Whisker-Plot) dienen

- die Faseranzahl und Faserstoff-Einwaage,
- die Faserabmessungen (Länge und Breite),
- die doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeiten (656 Klassen, Klassenbreite 50  $\mu\text{m}$ ) sowie
- die über das geglättete Häufigkeitspolygon erstellte doppelt-längengewichtete Summenhäufigkeitsverteilung.

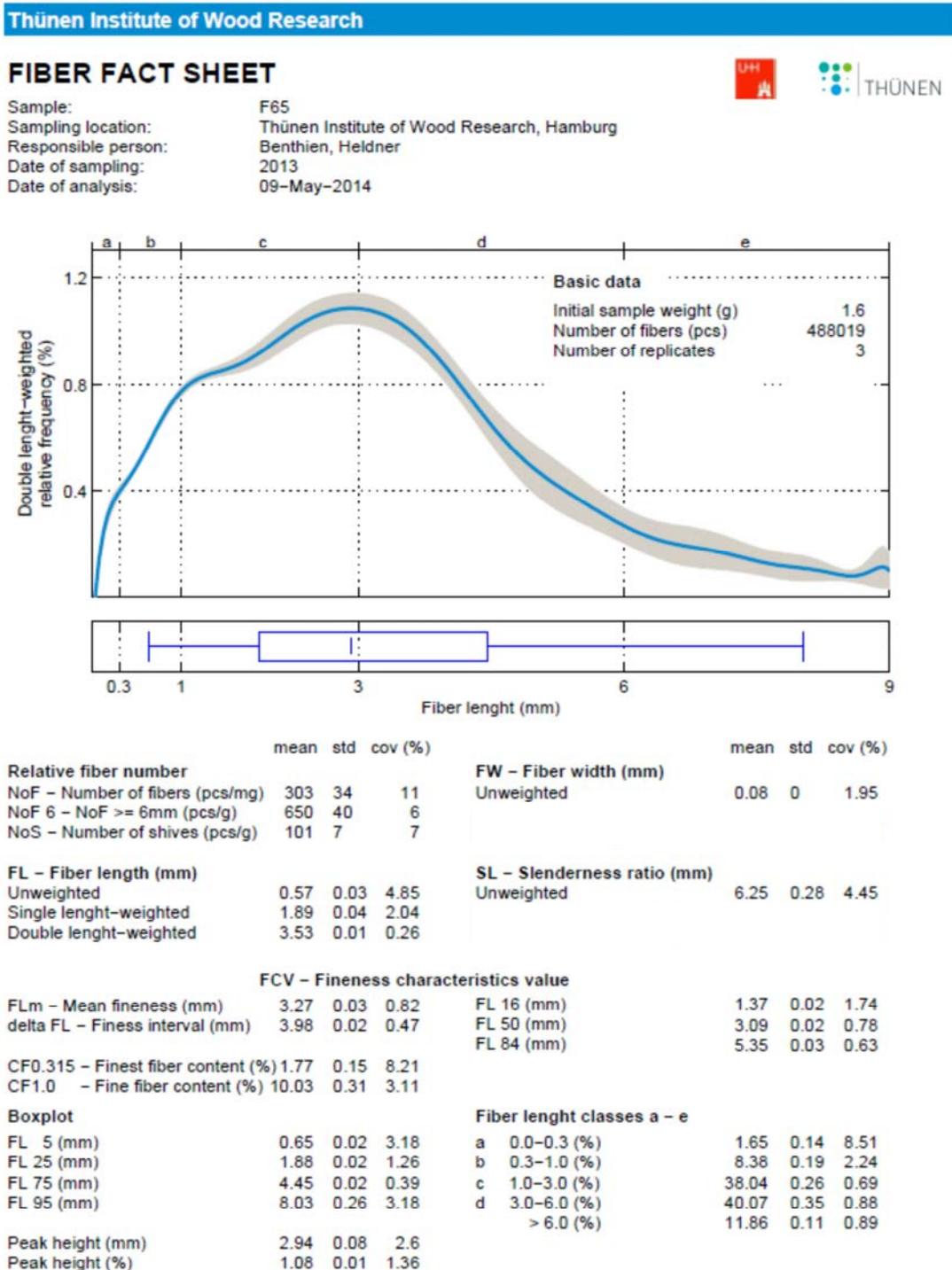


Abbildung 4: Muster eines Fiber-Fact-Sheets

### 2.4.1 Faserstoff-Einwaage und Faseranzahl (absolut)

**Initial sample weight:** Die Einwaage (engl.: initial sample weight) wird als Summe der Einwaagen der jeweiligen Wiederholungsmessungen angegeben.

**Number of fibers:** Die Faseranzahl (engl.: number of fibers) wird als Summe der Fasern der jeweiligen Wiederholungsmessungen angegeben.

### 2.4.2 Einwaage-bezogene Faseranzahl

**NoF:** Die normierte Faseranzahl (engl.: normalized number of fibers; kurz: NoF) ist der Quotient aus Faseranzahl und Einwaage und wird in Stück pro Milligramm (pcs/mg) angegeben. Dieser Kennwert liefert eine Aussage zur Fein- bzw. Grobheit des untersuchten Faserstoffes: Ist der Kennwert groß, so ist der Faserstoff fein, da pro Gramm Faserstoff viele Fasern gefunden wurden. Ist der Kennwert klein, so ist der Faserstoff grob, da pro Gramm Faserstoff wenig Fasern gefunden wurden.

**NoF 6:** Der Kennwert *NoF 6* ist der Quotient aus der Anzahl der Fasern mit einer Länge größer oder gleich 6 mm und der Einwaage in Stück pro Gramm (pcs/g). Dieser Kennwert charakterisiert den Grobanteil des untersuchten Faserstoffes.

**NoS:** Die Shive-Zahl (engl.: normalized number of Shives; kurz: NoS) ist der Quotient aus der Anzahl an Shives und der Einwaage und wird in Stück pro Gramm (pcs/g) angegeben. Als Shive werden hierbei all die Fasern definiert, die eine Breite von 550 µm und eine Helligkeitsintensität von 62.000 überschreiten.

### 2.4.3 Faserabmessungen

#### 2.4.3.1 Mittlere Faserlänge

**Faserlänge, ungewichtet:** Die *ungewichtete Faserlänge* (engl.: unweighted fiber length) oder mittlere Faserlänge ist der in mm angegebene Quotient aus der Summe der Faserlängen und der Faseranzahl.

$$l = \frac{\sum l_i}{n} \quad [1]$$

**Faserlänge, längen-gewichtet:** Die (einfach) *längen-gewichtete Faserlänge* (engl.: length-weighted fiber length) ist der in mm angegebene Quotient aus der Summe der Faserlängenquadrate und der Summe der Faserlängen.

$$l_1 = \frac{\sum l_i^2}{\sum l_i} \quad [2]$$

**Faserlänge, doppelt längen-gewichtet:** Die *doppelt längen-gewichtete Faserlänge* (engl.: double length-weighted fiber length) ist der in mm angegebene Quotient aus der Summe der zur dritten Potenz erhobenen Faserlängen und der Summe der Faserlängenquadrate.

$$l_2 = \frac{\sum l_i^3}{\sum l_i^2} \quad [3]$$

#### 2.4.3.2 Mittlere Faserbreite

**Faserbreite, ungewichtet:** Die *ungewichtete Faserbreite* (engl.: unweighted fiber width) oder mittlere Faserbreite ist der in mm angegebene Quotient aus der Summe der Faserbreiten und der Faseranzahl.

$$b = \frac{\sum b_i}{n} \quad [4]$$

#### 2.4.3.3 Schlankheitsgrad

**Schlankheitsgrad:** Der (ungewichtete) *Schlankheitsgrad* (engl.: slenderness ratio) oder mittlerer Schlankheitsgrad ist der Quotient aus der Summe der jeweiligen Quotienten aus Faserlänge und -breite und der Faseranzahl.

$$s = \frac{\sum (l_i/b_i)}{n} \quad [5]$$

### 2.4.4 Graphische Darstellung der doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeitsverteilung als geglättetes Häufigkeitspolygon

Als Ausgangsdatensatz für die graphische Darstellung der doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeitsverteilung als geglättetes Häufigkeitspolygon dienen die doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeiten, die sich nach der Zuordnung eines jeden Wiederholungsmessungs-

Rohdatensatzes in 656 Faserlängenklassen mit einer Klassenbreite von 50  $\mu\text{m}$  und der Fasergesamtanzahl berechnen lassen. Die Anzahl der Fasern je Klasse wird hierbei mit dem jeweiligen Klassenmittelwert des Längenquadrats multipliziert, um so die relative Anzahl von kurzen Fasern zu verringern und die relative Anzahl von längeren Fasern zu vergrößern (Gewichtungsprinzip). Zur Berechnung der relativen Häufigkeit wird durch die Fasergesamtanzahl dividiert. Korrespondierend zu den so kalkulierten relativen Häufigkeiten werden die Intervallmitten berechnet (Mittelwert aus Intervalluntergrenze und -obergrenze), sodass ein xy-Datensatz vorliegt. Diesem Datensatz wird nun eine Funktion angepasst (Ausgleichsrechnung; engl.: fitting), mit deren Hilfe auf die Darstellung des eigentlichen Häufigkeitspolygons (mit Linien verbundene Häufigkeiten) zugunsten einer geglätteten Ausgleichskurve verzichtet werden kann. Hierfür wurde eine Fourierreihe achter Ordnung als Regressionsmodell angewendet.

Mit dem Ziel, die doppelt-längengewichtete relative Häufigkeitsverteilung nicht allein auf die Darstellung des geglätteten Häufigkeitspolygons zu beschränken, wird das beschriebene Vorgehen zur Erstellung des geglätteten Häufigkeitspolygons analog auch für die Datensätze (+/-) der Standardabweichung angewendet und so eine Art Vertrauensbereich für das geglätteten Häufigkeitspolygons erstellt. Dieser wird im Hintergrund des geglätteten Häufigkeitspolygons als grauer Bereich dargestellt.

#### 2.4.5 Doppelt-längengewichtete relative Häufigkeitsverteilung für fünf Faserlängenklassen (a) bis (e)

Mit dem Ziel die doppelt-längengewichtete relative Häufigkeitsverteilung nicht allein graphisch in Form eines Häufigkeitspolygons darzustellen, werden fünf Faserlängenklassen (a) bis (e) mit den Intervallgrenzen

- (a) 0 - 0,3 mm
- (b) 0,3 - 1 mm
- (c) 1 - 3 mm
- (d) 3 - 6 mm
- (e) > 6 mm

definiert. Als Ausgangsdatsatz für die Berechnung der Häufigkeiten über die jeweiligen Intervalle dienen die doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeiten, die sich nach der Zuordnung eines jeden Wiederholungsmessungs-Rohdatensatzes in 656 Faserlängenklassen mit einer Klassenbreite von 50  $\mu\text{m}$  und der Fasergesamtanzahl berechnen lassen (siehe 2.4.4). Für die Berechnung der Häufigkeiten innerhalb der oben aufgelisteten Intervalle werden die Häufigkeiten des Ausgangsdatsatzes über die aufgelisteten Intervalle aufsummiert.

## 2.4.6 Kennwerte auf Basis der doppelt-längengewichteten Summenhäufigkeitsverteilung

Zur Erzeugung des Ausgangsdatensatzes, der zur Berechnung der Kennwerten auf Basis der doppelt-längengewichteten Summenhäufigkeitsverteilung dient, wird die Funktionsgleichung des geglätteten Häufigkeitspolynoms herangezogen. Durch sequenzielles Einsetzen einer Vielzahl von Faserlängen ( $x$ -Werte) und das anschließende Aufsummieren der Ergebnisse, werden korrespondierende Summenhäufigkeiten generiert und so ein  $xy$ -Datensatz erstellt.

### 2.4.6.1 Feinheitskennwerte

In Anlehnung an die zur Charakterisierung der Feinheit von Holzfaserstoffen durch trockene Siebfraktionierung von Jensen (1975) im Technischen Anleitungsblatt für die Holztechnologie 1975/2 vorgeschlagene Prüfmethode, werden Feinheitskennwerte ermittelt. Aufgrund der konzeptionellen Andersartigkeit des hier verwendeten Messsystems erfolgt die Ermittlung der Feinheitskennwerte nicht wie im Fall der von Jensen vorgeschlagenen Siebfraktionierung auf Basis einer Siebkennlinie (massenbasierte Durchgangssumme als Ordinatenachse und Siebmaschenweite als Abszissenachse), sondern auf Basis der doppelt-längengewichteten relativen Summenhäufigkeit (Ordinatenachse) und der Faserlänge auf der Abszissenachse. Hierbei lassen sich die ursprünglichen Feinheitskennwerte nicht direkt mit den hier generierten Feinheitskennwerte vergleichen, da die jeweiligen Bezugsgrößen (massenbasierte Durchgangssumme vs. anzahlbasierte Summenhäufigkeit sowie Siebmaschenweite vs. Faserlänge) elementar verschieden sind. Dennoch erscheint die Anpassung einer über Jahrzehnte etablierten Messgröße an die Gegebenheiten der modernen bildanalyse-basierten Faservermessung sinnvoll, da so bekannte Messgrößen betrachtet werden können.

Die Feinheitskennwerte lassen sich in Summenhäufigkeitswerte (engl.: cumulative frequency values) (CF-Werte) und Faserlängenwerte (engl.: fiber length values) (FL-Werte) unterteilen. Analog zu den ursprünglichen Feinheitskennwerten (z.B.  $K_m$  oder  $D_{1,0}$ ) werden die CF-Werte (Feinstfaseranteil  $CF_{0,315}$  und Feinfaseranteil  $CF_{1,0}$ ) und die FL-Werte (Mittlere Feinheit  $FL_m$  und Feinheitsintervall  $\Delta FL$ ) über die Summenhäufigkeitsverteilung ermittelt.

**CF-Werte:** Die CF-Werte können direkt aus dem erzeugten Summenhäufigkeitsdatensatz entnommen werden. Die Indizes der CF-Werte (z.B. 0,315 und 1,0) geben hierbei Faserlänge an, für die die Summenhäufigkeit ermittelt wurde.

**FL-Werte:** Die Berechnung der FL-Werte erfolgt auf Basis des Datensatzes, der durch das sequenzielle Einsetzen einer Vielzahl von Faserlängen in die Funktionsgleichung des Häufigkeitspolynoms erzeugt wurde. Entsprechend der zur Berechnung von Mittlerer Feinheit  $FL_m$  und Feinheitsintervall  $\Delta FL$  zugrunde liegenden Formeln,

$$FL_m = \frac{FL_{16} + FL_{50} + FL_{84}}{3} \quad [6]$$

und

$$\Delta FL = FL_{84} - FL_{16} \quad [7]$$

werden zunächst die FL-Werte  $FL_{16}$ ,  $FL_{50}$  und  $FL_{84}$  aus dem Datensatz bestimmt, um hieraus  $FL_m$  und  $\Delta FL$  berechnen zu können. Hierbei wird im Fall eines nicht eindeutig vorliegenden FL-Wertes zwischen den zwei um den gesuchten Wert liegenden Faserlängen interpoliert oder der Mittelwert verwendet.

#### 2.4.6.2 Box-Whisker-Plot

Als Ergänzung zum geglätteten Häufigkeitspolygon wird die doppelt-längengewichtete relative Häufigkeitsverteilung als Box-Whisker-Plot dargestellt. Hierfür werden FL-Werte generiert (5%-, 25%-, 75%- und 95%-Quantil), die dann zur Erstellung von Box ( $FL_{25}$ ,  $FL_{75}$ ) und Whisker ( $FL_5$ ,  $FL_{95}$ ) herangezogen werden. Anstelle der üblichen Darstellung des Median wird hier die Lage des Maximal-Peaks des geglätteten Häufigkeitspolygons angegeben. Der gewonnene Box-Whisker-Plot liefert nun eine komprimierte Darstellung der doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeitsverteilung und kann so einfach für den Vergleich verschiedener Faserstoffe herangezogen werden.

### 3 Laborversuche: Einfluss der Zerfaserungsparameter auf Faserstoffqualität und Platteneigenschaften

#### 3.1 Material und Methoden

##### 3.1.1 Fasermaterial

Zur Herstellung der Versuchsfasern wurden am Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH (IHD, Dresden, Deutschland) aus verschiedenen Hölzern Hackschnitzel hergestellt und diese anschließend in einem Labor-Refiner zu Fasern verarbeitet. Neben der Herstellung von Faserstoff allein aus Kiefer (*Pinus sylvestris*), Buche (*Fagus sylvatica*), Birke (*Betula* spp.) und Pappel (*Populus* spp.), wurde ein Gemisch aus Kiefern- und Buchenhackschnitzeln zerfasert (50/50 wt%). Während des Zerfaserungsprozesses wurden keine Chemikalien zugesetzt und es wurde keine Blow-line-Beleimung durchgeführt.

Die Faserherstellung wurde in Zerfaserungsserien vorgenommen, da zum Zeitpunkt der ersten Zerfaserung (Serie A) nicht alle Holzarten verfügbar waren. In der Zerfaserungsserie A wurde sich auf die Herstellung von Fasern unter verschiedenen Kochbedingungen und der Variation des Stoffauslasses (radial/ tangential) konzentriert, während in Serie 2 der Mahlscheibenabstand (0,06, 0,15 und 0,6 mm) verändert und die Fasern aus verschiedenen Holzarten hergestellt wurden. Aufgrund der Zerfaserung in zwei Serien liegen Kiefernfasern vor, die unter identischen Herstellungsbedingungen versucht wurden herzustellen.

Die Zerfaserungsbedingungen der untersuchten Faserstoffe sind in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1:** Zerfaserungsbedingungen der untersuchten Faserstoffe (Laborversuche)

<b>Faser</b>	<b>Holzart</b>	<b>Koch- temperatur (°C)</b>	<b>Kochdauer (min)</b>	<b>Mahlscheiben- abstand (mm)</b>	<b>Stoffauslass</b>
A1	Kiefer	143	1	0,15	radial
A2	Kiefer	170	4	0,15	radial
A3	Kiefer	200	8	0,15	radial
A4	Kiefer	170	1	0,15	radial
A5	Kiefer	170	8	0,15	radial
A6	Kiefer	200	4	0,15	radial
A7	Buche	164	4	0,15	radial
A8	Buche	170	4	0,15	radial
A9	Kiefer	170	4	0,20	tangential
B1	Kiefer	170	4	0,06	radial
B2	Kiefer	170	4	0,15	radial
B3	Kiefer	170	4	0,6	radial
B4	Buche	170	4	0,15	radial
B5	Kiefer/Buche	170	4	0,15	radial
B6	Birke	170	4	0,15	radial
B7	Pappel	170	4	0,15	radial

### 3.1.2 Klebharz

Für die Prüfplattenherstellung wurde ein flüssiges Harnstoff-Formaldehyd-Klebharz (Kaurit 350, BASF, Ludwigshafen, Deutschland) verwendet. Als Härter wurde eine 40%ige Ammoniumnitrat-Lösung ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) eingesetzt.

### 3.1.3 Plattenherstellung

Die Beleimung der Fasern wurde in einem Trommelmischer vorgenommen. Dem Klebharz wurde 1% Härter zugegeben. In Abhängigkeit der Feuchte der Fasern wurde weiter so viel Wasser zugeetzt, dass die Fasermatte eine Feuchte von 12% hatte. Der Klebstoffanteil betrug 12%.

Mit Hilfe einer Formbox wurden die beleimten Fasern zu einem Faserkuchen mit den Abmessungen 500 x 500 mm gestreut. Nach der Vorverdichtung für ca. 2 min wurden die Fasern bei 190 °C, einem spezifischen Pressdruck von 716 N/cm<sup>2</sup> und einem Presszeitfaktor von 12 sec/mm (192 sec) in einer Heißpresse zu Platten mit einer Dicke von 16 mm und einer Zieldichte von 650 kg/m<sup>3</sup> verpresst.

### 3.1.4 Faserstoff-Charakterisierung

Die Charakterisierung der Faserstoffe wurde mittels der in Kapitel 2 beschriebenen Methode vorgenommen.

### 3.1.5 Plattenprüfung

Es wurden je Faserstofftyp drei Prüfplatten hergestellt. Vor dem Prüfkörperzuschnitt wurde den Platten Zeit zum Auskühlen gegeben und die Kanten wurden besäumt. Die Klimatisierung der Prüfkörper erfolgte für die Dauer von 2 Wochen. Informationen zu den Prüfkörperabmessungen, der Anzahl der Prüfkörper sowie die verwendete Prüfnorm können Tabelle 2 entnommen werden.

**Tabelle 2:** Prüfkörperabmessungen und angewendete Prüfnormen

<b>Eigenschaft</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Norm</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Abmessungen</b>	<b>Anmerkung</b>
Querzugfestigkeit	IB	EN 319	18	50 x 50 mm	
Dickenquellung	TS	EN 317	18	50 x 50 mm	2 h und 24 h
Wasseraufnahme	WA	EN 317	18	50 x 50 mm	2 h und 24 h
Biege-E-Modul	MOE	EN 310	12	370 x 50 mm	
Biegefestigkeit	MOR	EN 310	12	370 x 50 mm	
Abhebefestigkeit	SS	EN 311	18	50 x 50 mm	

### 3.1.6 Statistische Analyse

Die Signifikanz von Kennwertunterschieden der Faserstoff-Charakterisierung sowie der Platteneigenschaften beurteilen zu können, wurde durch eine Varianzanalyse (ANOVA) und eine Tukey HSD, unter Verwendung des Analysetool von SAS JMP, geprüft. Die Nullhypothese wurde hier akzeptiert (kein Effekt), wenn der p-Wert das Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  übersteigt.

## 3.2 Ergebnisse und Diskussion

Durch Kombination bestimmter in Tabelle 1 aufgeführter Faserstoffe wird der Einfluss verschiedener Zerfaserungsparameter auf die Faserstoffzusammensetzung sowie weiter der Einfluss der Faserstoffzusammensetzung auf die Platteneigenschaften erarbeiten.

### 3.2.1 Einfluss von Kochtemperatur und -dauer

Zur gezielten Betrachtung des Einflusses von Kochtemperatur und Kochdauer wurden fünf Gruppen a) bis e) gebildet,

- a) Extreme Zerfaserungsbedingungen (A1, A2, A3),
- b) Einfluss der Kochdauer bei 170 °C (A4, A2, A5),
- c) Einfluss der Kochdauer bei 200 °C (A6, A3),
- d) Einfluss der Kochtemperatur bei einer Kochdauer von 4 min (Kiefer) (A2, A6) und
- e) Einfluss der Kochtemperatur bei einer Kochdauer von 4 min (Buche) (A7, A8),

für die im Folgenden die Ergebnisse der Faserstoffvermessung und der Prüfplattenuntersuchung getrennt voneinander dargestellt werden.

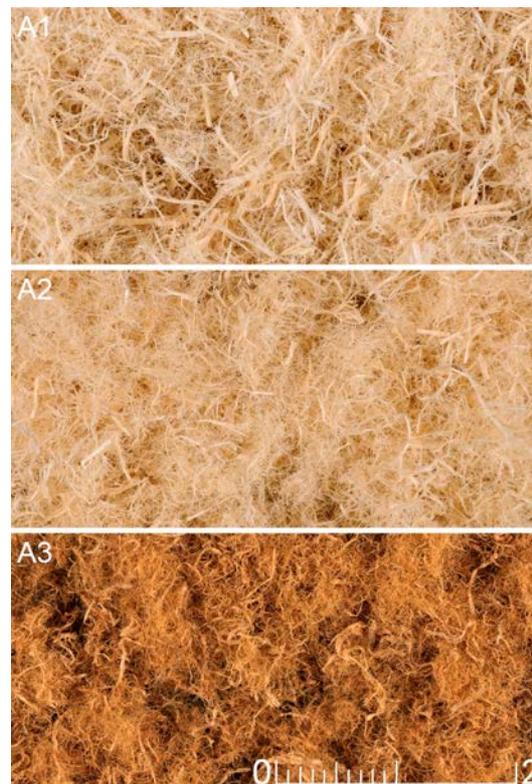
#### 3.2.1.1 a: Extreme Zerfaserungsbedingungen

Für die in Gruppe a) betrachteten Faserstoffe, die ergänzend zum Referenzfaserstoff A2 (170 °C, 4 min) unter extremen Bedingungen (A1: 143 °C, 1 min; A3: 200 °C, 8 min) gekocht wurden, konnte gezeigt werden, dass mit Intensivierung der Kochbedingungen die (doppelt-längengewichtete) mittlere Faserlänge signifikant abnimmt, während die normierte Faseranzahl signifikant steigt (Tabelle 3). Dieses Ergebnis zeigt, dass mit zunehmend intensiven Kochbedingungen die Zerfaserung der Holzsubstanz (Hackschnitzel) im Refiner zu Einzelfasern und Faserfragmenten umfassender vonstatten geht. Die gleiche Schlussfolgerung legt die Betrachtung der (doppelt-längengewichteten relativen) Häufigkeitsverteilung des untersuchten Faserstoffes nahe: Der Feinanteil (0 bis 3 mm) steigt mit zunehmend intensiveren Kochbedingungen, während der Grobanteil (3 bis > 6 mm) abnimmt. Anhand der visuellen Faserstoffbegutachtung (Abbildung 5) ist aufgrund der Faserstofffärbungen zu vermuten, dass der Kochprozess chemische Veränderungen an der Holzsubstanz bewirkt hat.

Mit Ausnahme der Biegefestigkeit (MOR) der Prüfkörper, die aus der Faser A1 hergestellt wurden, sind für alle Prüfplatten in der Weise sinkende Eigenschaftswerte gefunden worden (Tabelle 4), wie es aufgrund der intensivierten Kochbedingungen bei der Herstellung der verwendeten Fasern zu erwarten gewesen ist. Das bedeutet eine Verbesserung von Dickenquellung (TS) und Wasseraufnahme (WA) und eine Verringerung der mechanischen Eigenschaften, wenn zunehmend intensiv aufgeschlossene Faserstoffe zur Herstellung der Platten verwendet wurden. Statistische Signifikanz ließ sich nicht durchgängig für alle Prüfplatten nachweisen.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen, dass die Kochbedingungen der Faserstoffherstellung die Eigenschaften der hieraus hergestellten Platten beeinflussen. Mit zunehmend intensiven Kochbedingungen ist von einem zunehmend stärkeren Abbau von Hemicellulosen auszugehen, was eine Verringerung der Benetzbarkeit mit Wasser und Klebharz zur Folge hat. Hierüber lassen

sich die verbesserte TS und WA, sowie die verringerten mechanischen Eigenschaften erklären. Die Platte wird zum einen weniger zugänglich für Wasser und quillt daher weniger; zum anderen bewirkt die verschlechterte Benetzbarkeit mit Klebstoff eine geringere Ausbildung der Festigkeit zwischen Holzfaser und Kleber, was sich in verringerten mechanischen Eigenschaften widerspiegelt. Die intensivere Zerfaserung mit zunehmend schärferen Kochbedingungen hat zur Folge, dass eine größere Oberfläche mit der gleichen Menge an Klebharz beaufschlagt werden muss und entsprechend die relative Anzahl an Verbindungspunkten (Klebharztröpfchen) zwischen den Fasern abnimmt. Dies erklärt weiter die Verringerung der mechanischen Eigenschaften.



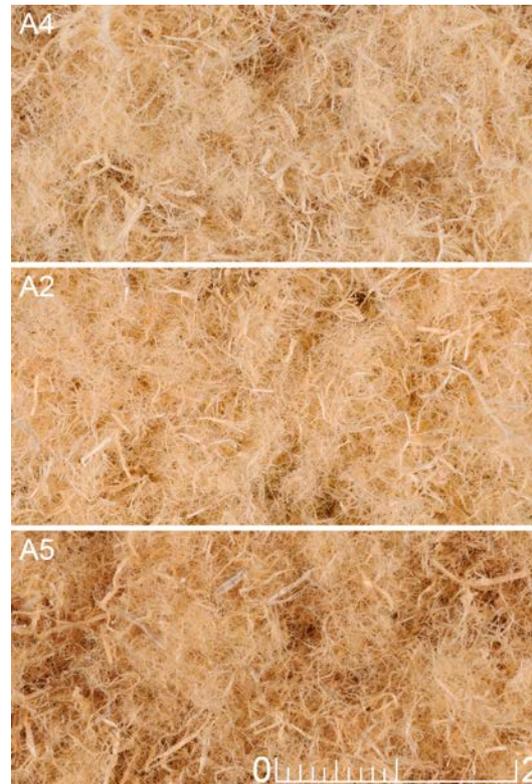
**Abbildung 5:** Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe a) (Maßstab in mm)

### 3.2.1.2 b: Einfluss der Kochdauer bei 170 °C

Mit dem Ziel den Einfluss der Kochdauer auf die Faserstoffqualität und weiter den Einfluss der Faserstoffqualität auf die Eigenschaften von MDF zu ermitteln, wurden in Gruppe b) drei Faserstoffe kombiniert, für deren Herstellung die Hackschnitzel bei einer Temperatur von 170 °C für 1 min (A4), 4 min (A2) und 8 min (A5) gekocht wurden. Die Ergebnisse der Faserstoff-Charakterisierung waren jedoch nicht so eindeutig, wie sie auf Basis des Versuchsaufbaus bzw. den Ergebnissen der Versuche in Gruppe a) zu erwarten gewesen wären. Abgesehen vom Staubeanteil (0 bis 0,3 mm) wurden für die normierte Faseranzahl, die (doppel-längengewichtete) Faserlänge sowie die (doppelt-längengewichtete relative) Häufigkeitsverteilung der Faserstoffe A4 und A5 in die gleiche und der Faserstoff A2 in eine eigene homogenen Gruppen (Tukey-Test) ein-

geordnet. Da bedeutet, dass sich A4 und A5 nicht, wohl aber A2 von A4 und A5 unterscheidet. Dieses Ergebnis ist schwer zu erklären, da die Durchwärmung der Hackschnitzel und damit die Zerfaserung der Hackschnitzel mit zunehmender Kochdauer homogener ablaufen sollte. Entsprechend wäre mit Unterschieden zwischen den Fasern zu rechnen gewesen, die kurz (1 min) und länger (4 und 8 min) gekocht wurden. Ähnlich schwer zu erklärende Ergebnisse wurden bei der Bestimmung der Prüfplatten-Eigenschaften erzielt.

Abweichend von dem eigentlich beabsichtigten Ergebnis der Kombination dieser Faserstoffe kann geschlussfolgert werden, dass die Herstellung von Faserstoffen zur Erarbeitung von Einflussgrößen auf die Faserstoffeigenschaften sequenziell gestaffelt erfolgen muss. D.h. die Veränderung der Kochdauer hätte stufenweise von z.B. niedrig zu hoch erfolgen müssen, um so Effekte ungenügend-reproduzierbarer Prozesseinstellungen, insbesondere des Mahlscheibenabstandes (siehe hierzu Kapitel 3.2.3), zu vermeiden. Neben den Messwerten der Faserstoffcharakterisierung deutet bereits die visuelle Faserstoffbegutachtung (Abbildung 6) darauf hin, dass nur eine gestaffelte Parametervariation in der Lage ist, die zu untersuchenden beabsichtigte Einflussgrößen abzubilden (optische Unterschiede zwischen A2 und A4/A5).

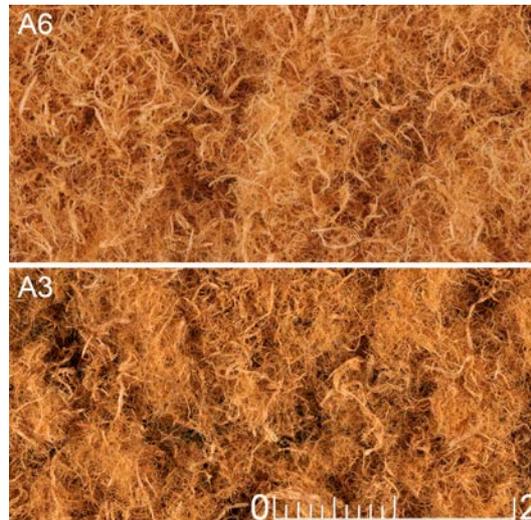


**Abbildung 6:** Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe b) (Maßstab in mm)

### 3.2.1.3 c: Einfluss der Kochdauer bei 200 °C

Entgegen der begrenzten Aussagekraft des für Gruppe b) erzielten Ergebnisses, lässt sich der Einfluss der Kochdauer auf die Faserstoffqualität und weiter den Einfluss der Faserstoffqualität auf die Eigenschaften von MDF anhand der in Gruppe c) kombinierten Faserstoffe nachvollziehen. Abgesehen von gelegentlich fehlender Signifikanz der Ergebnisse wird anhand der Versuche klar, dass mit zunehmender Kochdauer (von 4 auf 8 min) der Aufschluss der Holzsubstanz umfassender abläuft. Die relative Anzahl an Faser steigt, die (doppelt-längengewichtete) Faserlänge sinkt und die (doppelt-längengewichtete relative) Häufigkeit von feinen Fasern steigt, während die von groben Fasern sinkt.

Die Verringerung von Dickenquellung (TS) und Wasseraufnahme (WA) (beide 24 h) lässt sich wie für Gruppe a) gut mit dem zunehmend hydrophoben Charakter der Fasern erklären. Der Anstieg von Biege-Elastizitätsmodul (MOE) und Abhebefestigkeit (SS) könnte durch möglicherweise dichtere Plattendeckschichten zu erklärt sein, die ihrerseits ein Resultat der feineren, leicht zu komprimierende Fasern sein könnte.



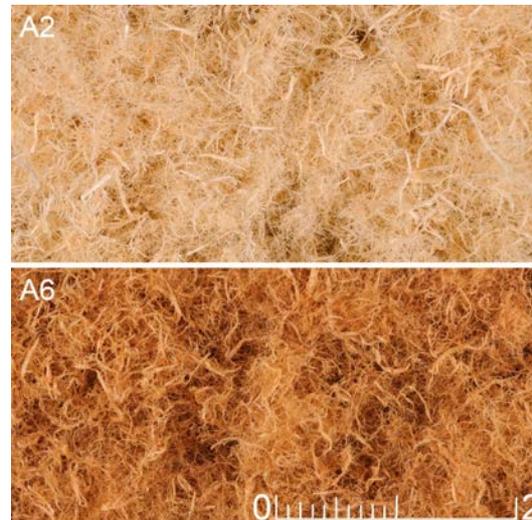
**Abbildung 7:** Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe c) (Maßstab in mm)

### 3.2.1.4 d: Einfluss der Kochtemperatur bei einer Kochdauer von 4 min (Kiefer)

Signifikante Unterschiede zwischen den in Gruppe d) kombinierten Faserstoffen, anhand derer der Einfluss der Kochtemperatur (170 °C, 200 °C) aufgezeigt werden soll, sind lediglich für den Bereich von 3 bis 6 mm der (doppelt-längengewichteten relativen) Häufigkeitsverteilung darstellbar. Für die übrigen Kennwerte ist zwar keine Signifikanz nachweisbar, jedoch kann anhand der Mittelwerte von normierter Faseranzahl, (doppelt-längengewichteter) Faserlänge und Häufigkeit (> 3 mm) abgeleitet werden, dass mit zunehmender Kochtemperatur eine Intensivierung der Zerfaserung stattfindet.

Die Ergebnisse der Plattenprüfung decken sich mit den Ergebnissen der Plattenprüfung in Gruppe a); mit zunehmend intensiven Aufschlussbedingungen (hier Kochtemperatur) verschlechtern sich die mechanischen Eigenschaften und Dickenquellung, die Wasseraufnahme verbessert sich.

Auf Basis der Platteneigenschaften wären deutlichere Unterschiede in der Faserstoffqualität zu erwarten gewesen, da hier nahezu für alle Eigenschaften signifikante Unterschiede gefunden wurden. Gleiches gilt für die visuelle Faserbegutachtung (siehe Abbildung 8), die aufgrund der enormen Farbunterschiede der Fasern Unterschiede in der Faserstoffqualität impliziert. Nicht-morphologische Eigenschaften wie z.B. chemische Veränderungen der Holzsubstanz oder Sprödigkeit der Einzelfasern aufgrund stärkerer thermischer Beanspruchung bei der Hackschnitzelkochung werden bei der bildanalytischen Faserstoffcharakterisierung jedoch nicht erfasst, sodass fehlende Unterschiede zwischen den Faserstoffqualitäten nachvollziehbar sind.

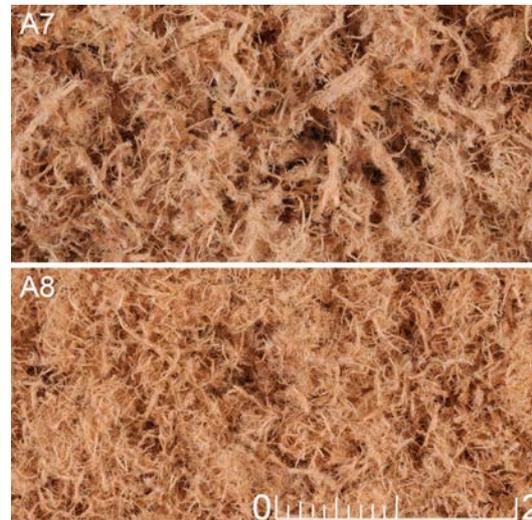


**Abbildung 8:** Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe d) (Maßstab in mm)

### 3.2.1.5 e: Einfluss der Kochtemperatur bei einer Kochdauer von 4 min (Buche)

Die Ergebnisse der in Gruppe e) kombinierten Faserstoffe spiegeln die Ergebnisse der in Gruppe d) kombinierten Faserstoffe wieder: Die alleinige Veränderung der Kochtemperatur, hier sogar auf einem deutlich geringerem Niveau, lassen kaum signifikante Unterschiede in der Faserstoffqualität erkennen. Auffällig ist jedoch, dass sich die Mittelwerte der Kennwerte in der Weise unterscheiden, wie es aufgrund der Ergebnisse der Faserstoffe in Gruppe a) zu erwarten gewesen wäre: Die normierte Faseranzahl steigt, die (doppelt-längengewichtete) Faserlänge sinkt und die (doppelt-längengewichtete relative) Häufigkeit von feinen Fasern steigt, während die Häufigkeit von groben Fasern mit zunehmend intensiveren Kochbedingungen sinkt.

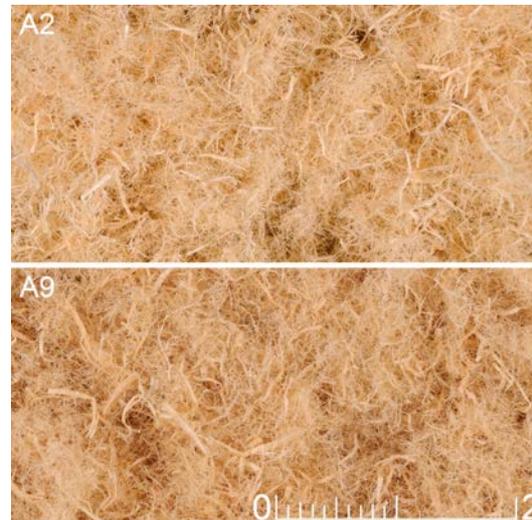
Entgegen den Ergebnissen der übrigen Faserstoffkombinationen wurde in dieser Versuchsreihe deutlich, dass sich nicht allein Dickenquellung und Wasseraufnahme bei Verwendung zunehmend intensiv aufgeschlossener Faserstoffe verbessern, sondern auch die mechanischen Eigenschaften verbessert sind. Dies erscheint zunächst widersprüchlich, muss jedoch unter dem Aspekt betrachtet werden, dass hier Buchenholz betrachtet wird und die Kochtemperatur von einem niedrigeren Niveau erhöht wurde, als es für Gruppe c) und d) der Fall war.



**Abbildung 9:** Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe e) (Maßstab in mm)

### 3.2.2 Einfluss des Stoffauslasses

Um den Einfluss der Art des Stoffauslasses am Refiner auf die Faserstoffqualität zu bestimmen, werden im Folgenden die Faserstoffe A2 und A9 miteinander verglichen. Während für den Faserstoff A2 ein radialer Stoffauslass montiert war, wurde der Faserstoff A9 unter Verwendung eines tangentialen Stoffauslasses hergestellt. Die Ergebnisse zeigen klar (Tabelle 3), dass der Faserstoff A2 signifikant feiner als A9 ist. Mit Blick auf das Ziel dieses Versuches erscheint dieses Ergebnis jedoch fragwürdig, da ein tangentialer Stoffauslass als schonender für die Fasern (Mäbert und Krug, 2009) angenommen wird. Wie jedoch auch anhand anderer Faserstoffkombinationen in diesem Kapitel deutlich wurde (z.B. Kapitel 3.2.1.2), ist es schwierig Zerfaserungsbedingungen zu reproduzieren, wenn die Parameter nicht subsequent verändert wurden. Nach Herstellerangaben war der Mahlscheibenabstand für die Herstellung des Faserstoffes A9 größer (0,2 mm) als der von A2 (0,15 mm). Der Einfluss der Art des Stoffauslasses ist hier also klar vom Mahlscheibenabstand überlagert, was die Unterschiede zu bisherigen Erkenntnissen zum Einfluss des Stoffauslasses auf die Faserstoffqualität erklärt.



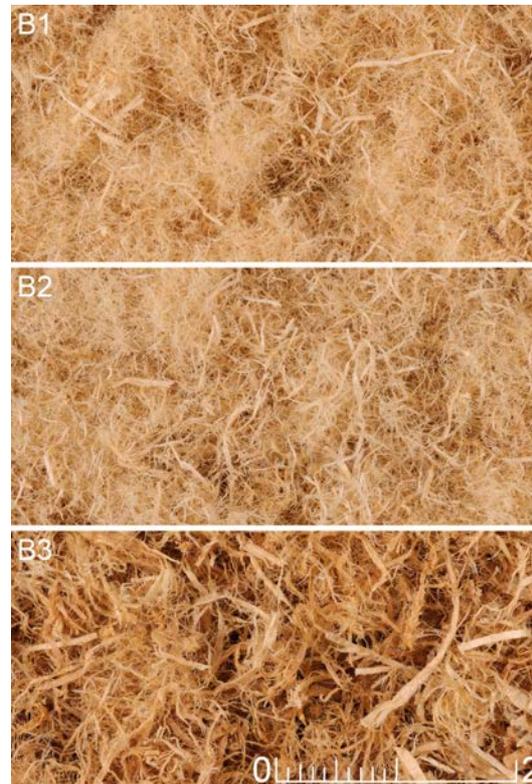
**Abbildung 10:** Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe, an denen der Einfluss des Stoffauslasses untersucht wurde. (Maßstab in mm)

### 3.2.3 Einfluss des Mahlscheibenabstandes

Der Einfluss des Mahlscheibenabstandes auf die Faserstoffqualität wurde anhand von Faserstoffen untersucht, die in der Zerfaserungsserie B unter schrittweiser Veränderung des Mahlspaltes (0,06, 0,15 und 0,6 mm) hergestellt wurden. Mit Ausnahme der doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeit des Feinanteils (0 bis 3 mm) ist trotz gelegentlich fehlender Signifikanz einzelner Kennwerte stets ein deutlicher Anstieg der Grobheit des Faserstoffes mit zunehmendem Mahlscheibenabstand zu beobachten. Dieses Ergebnis bestätigt die allgemein bekannten Zusammenhänge von Mahlscheibenabstand und Faserstoffqualität, wie sie aus der visuellen Faserstoffbegutachtung bekannt sind und sich anhand von Abbildung 11 nachvollziehen lassen, macht dieses subjektive Einschätzung jedoch numerisch erfassbar und objektiv vergleichbar.

Die Unterschiede zwischen den Eigenschaften der Prüfplatten, die aus den eben beschriebenen Faserstoffen hergestellt wurden, sind uneinheitlich und undeutlich. Die Querkzugfestigkeit fällt für die Platten aus dem feinsten Faserstoff im Vergleich etwas geringer aus, während die Platten aus den größten Fasern die geringste Wasseraufnahme (24 h) zeigen. Signifikante Unterschiede zwischen den Platten aus den verschiedenen Faserstoffen wurden für die Biegeeigenschaften festgestellt, wobei hier kein Zusammenhang zwischen Fasergröb-/feinheit zu erkennen ist.

Die Kombination der Ergebnisse aus Faserstoffcharakterisierung und der Eigenschaftsbestimmung der Prüfplatten deutet darauf hin, dass zwar der Mahlscheibenabstand die Faserstoffqualität maßgeblich beeinflusst, die Grobheit der Fasern aber weniger stark die Eigenschaften der Faserplatten beeinflusst. Die Grobheit von Faserstoffen ist folglich bei der späteren Verarbeitung der Faserplatten (Lackierung oder andere Beschichtungen) von größerer Bedeutung.



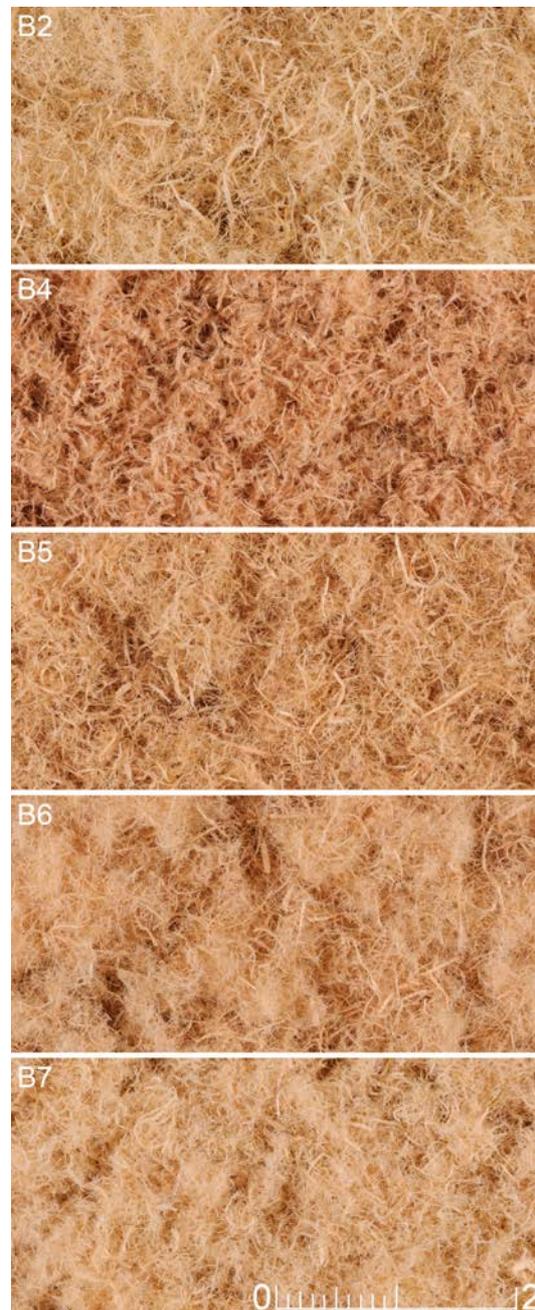
**Abbildung 11:** Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe, an denen der Einfluss des Mahl-scheibenabstandes untersucht wurde. (Maßstab in mm)

### 3.2.4 Einfluss der Holzart

Der Einfluss der Holzart auf die Faserstoffqualität wurde anhand von Faserstoffen untersucht, die in der Zerfaserungsserie B unter Einsatz verschiedener Hölzer (Kiefer, Buche, Birke und Pappel) sowie einem Mix aus Kiefern- und Buchenhackschnitzeln hergestellt wurden. Mit Blick auf die Gesamtheit der untersuchten Holzarten ist auffällig, dass für den Faserstoff aus reinem Nadelholz (B2) die mit Abstand geringste (normierte) Anzahl an Fasern je mg Einwaage gemessen wurde, die (doppelt-längengewichtete) Faserlänge am größten ist, die (doppelt-längengewichtete relative) Häufigkeit von feinen Fasern am geringsten und die Häufigkeit von groben Fasern am größten ist (Tabelle 3). Signifikante Unterschiede zwischen der normierten Faseranzahl bestehen zwischen den Laubholzfasern nicht. Im Fall der (doppelt-längengewichteten) Faserlänge fällt die Buche als besonders kurz auf, während sich die Faserstoffe aus einem Mix aus Kiefern und Buchenhackschnitzeln sowie die reinen Birken- und Pappelhackschnitzeln auf einem ähnlichen Niveau befinden. Die genauere Betrachtung der Faserstoffzusammensetzung anhand der (doppelt-längengewichteten relativen) Häufigkeit zeigt, dass B4 (Buche) der deutlich feinste Faserstoff ist. Trotz signifikanter Unterschiede zwischen den Kennwerten der Faserstoffcharakterisierung erscheinen Birken- und Pappelfaserstoffe als recht ähnlich. Die Kennwerte für den Mix aus Kiefern- und Buchenhackschnitzeln spiegeln deutlich ihre Zusammensetzung wieder, wobei im Fall der

normierten Faseranzahl deutlich die feinen Strukturen der Buche und im Fall der gewichteten Kennwerte die groben Fasern von B2 dominieren.

Zusammenhänge zwischen den vornehmlich auf Faserlänge-basierten Kennwerten und den Eigenschaften der Prüfplatten sind nicht augenscheinlich. Die größten Unterschiede wurden vornehmlich zwischen Kiefern- und Pappelfaserstoff und nicht zwischen Kiefern- und Buchenfaserstoff gefunden. Insgesamt wird jedoch deutlich, dass eine Variation der Holzart eine messbare Veränderung der Faserstoffqualität zur Folge hat und weiter die Eigenschaften von Prüfplatten beeinflusst.



**Abbildung 12:** Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe, an denen der Einfluss der Holzart untersucht wurde. (Maßstab in mm)

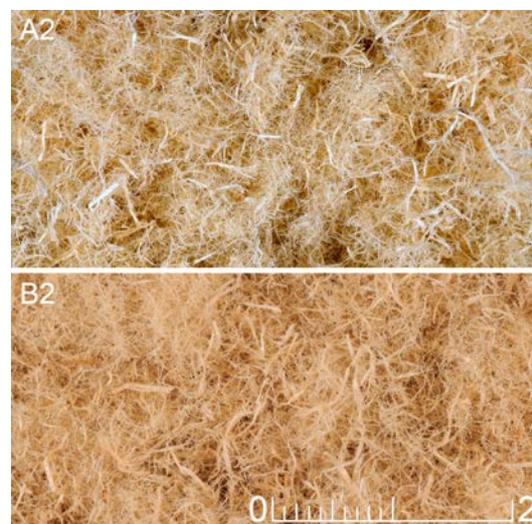
### 3.2.5 Reproduzierbarkeit der Zerfaserungsbedingungen

Aufgrund der Durchführung der Faserherstellung im Rahmen von zwei Zerfaserungsserien (A und B) liegen zwei Kiefernfasernstoffe (A2 und B2) vor, die unter der Maßgabe gleicher Prozessparameter hergestellt wurden (Kochtemperatur: 170°C, Kochdauer: 4 min, Mahlscheibenabstand: 0,15 mm). Anhand der bestimmten Kennwerte zur Beschreibung der Faserstoffqualität (Tabelle 3) wird deutlich, dass die Reproduktion einer bestimmten Faserstoffqualität nicht zwangsläufig

über die Einstellung gleicher Prozessparameter zu erreichen ist; alle Kennwerte unterscheiden sich signifikant voneinander.

Die Andersartigkeit der zwei Faserstoffe spiegelt sich an einem Teil der Platteneigenschaften (IB, TS 2h, WA 2h und WA 24h) wider (signifikante Unterschiede), bleibt jedoch im Fall der übrigen Eigenschaften (TS 24h, MOE, MOR und SS) im Rahmen der Schwankungsbreite der Prüfplattenherstellung.

Mit der hier dargestellten Versuchsreihe konnte gezeigt werden, dass die Reproduktion einer Faserstoffqualität allein auf Basis der Einstellung gleicher Zerfaserungsbedingungen nicht möglich ist und veranschaulicht deutlich den Bedarf für ein Messgerät, mit dem sich Faserstoffqualitäten definieren sowie deren Herstellung überwachen und optimieren lassen.



**Abbildung 13:** Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe, an denen der Einfluss des Zerfaserungszeitpunktes (Reproduzierbarkeit) untersucht wurde. (Maßstab in mm)

**Tabelle 3:** Fasereigenschaften

Einflussgröße	Faser	Anzahl der Messungen (pcs)	Faseranzahl je Messung (10 <sup>3</sup> pcs)	Einwaage je Messung (g)	Normierte Faseranzahl (pcs/mg)	Doppelt-längen-gewichtete Faserlänge (mm)	Doppelt-längengewichtete relative Häufigkeit							
							0 - 0.3 mm		0.3 - 1.0 mm		1.0 - 3.0 mm		3.0 - 6.0 mm	
							(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
<b>Kochtemperatur/-dauer</b>														
a)														
143 °C/ 1 min	A1	10	159 (15)	0.51 (0.02)	313 (30) C	3.23 (0.10) A	1.9 (0.0) B	9.1 (0.5) C	45.8 (1.4) C	32.7 (1.0) A	10.5 (1.2) A			
170 °C/ 4 min	A2	10	222 (14)	0.49 (0.01)	456 (21) B	2.64 (0.08) B	2.2 (0.2) B	11.7 (0.8) B	54.5 (1.2) B	27.0 (1.4) B	4.7 (0.5) B			
200 °C/ 8 min	A3	10	265 (37)	0.51 (0.02)	514 (65) A	2.32 (0.07) C	3.3 (0.5) A	15.8 (1.0) A	56.5 (0.6) A	21.3 (1.1) C	3.1 (0.5) C			
b)														
170 °C/ 1 min	A4	3	178 (20)	0.50 (0.02)	357 (28) B	3.19 (0.10) A	1.9 (0.3) A	8.7 (0.4) A	46.0 (2.0) A	33.6 (1.1) A	9.8 (1.3) A			
170 °C/ 4 min	A2	10	222 (14)	0.49 (0.01)	456 (21) A	2.64 (0.08) B	2.2 (0.2) A	11.7 (0.8) B	54.5 (1.2) B	27.0 (1.4) B	4.7 (0.5) B			
170 °C/ 8 min	A5	3	170 (13)	0.50 (0.01)	340 (28) B	3.08 (0.11) A	1.8 (0.3) A	9.1 (0.4) A	48.2 (2.0) A	32.6 (0.8) A	8.3 (1.3) A			
c)														
200 °C/ 4 min	A6	3	248 (32)	0.54 (0.01)	463 (62) A	2.55 (0.13) A	2.0 (0.3) B	11.7 (1.2) B	57.2 (1.3) A	25.1 (1.6) A	3.9 (0.8) A			
200 °C/ 8 min	A3	10	265 (37)	0.51 (0.02)	514 (65) A	2.32 (0.07) B	3.3 (0.5) A	15.8 (1.0) A	56.5 (0.6) A	21.3 (1.1) B	3.1 (0.5) A			
d)														
170 °C/ 4 min	A2	10	222 (14)	0.49 (0.01)	456 (21) A	2.64 (0.08) A	2.2 (0.2) A	11.7 (0.8) A	54.5 (1.2) B	27.0 (1.4) A	4.7 (0.5) A			
200 °C/ 4 min	A6	3	248 (32)	0.54 (0.01)	463 (62) A	2.55 (0.13) A	2.0 (0.3) A	11.7 (1.2) A	57.2 (1.3) A	25.1 (1.6) A	3.9 (0.8) A			
e)														
164 °C/ 4 min (Buche)	A7	3	150 (6)	0.53 (0.02)	283 (24) A	2.32 (0.24) A	7.0 (0.5) A	23.3 (2.1) A	43.2 (2.9) A	20.8 (2.3) A	5.7 (2.5) A			
170 °C/ 4 min (Buche)	A8	3	183 (65)	0.52 (0.02)	347 (112) A	1.93 (0.17) A	5.7 (1.8) A	28.2 (4.8) A	47.6 (4.4) A	16.1 (1.8) B	2.4 (0.6) A			
<b>Stoffauslass</b>														
radial <sup>1)</sup>	A2	10	222 (14)	0.49 (0.01)	456 (21) A	2.64 (0.08) B	2.2 (0.2) A	11.7 (0.8) A	54.5 (1.2) A	27.0 (1.4) B	4.7 (0.5) B			
tangential <sup>2)</sup>	A9	3	185 (26)	0.51 (0.02)	366 (64) B	3.09 (0.06) A	1.8 (0.5) A	8.8 (0.5) B	47.7 (0.2) B	33.5 (1.0) A	8.3 (0.3) A			
<b>Mahlscheibenabstand</b>														
0.06 mm	B1	3	210 (15)	0.49 (0.01)	432 (31) A	2.64 (0.09) B	1.6 (0.1) A	10.8 (0.8) A	55.5 (1.8) A	28.0 (1.9) B	4.2 (0.7) B			
0.15 mm	B2	3	164 (13)	0.48 (0.02)	340 (34) B	3.02 (0.11) B	1.8 (0.2) A	9.1 (0.7) A	48.7 (0.4) B	33.3 (0.8) A	7.1 (1.1) B			
0.6 mm	B3	3	69 (16)	0.49 (0.03)	141 (25) C	4.06 (0.33) A	1.4 (0.1) A	5.8 (1.1) B	39.8 (3.1) C	34.7 (1.0) A	18.3 (3.4) A			
<b>Holzart</b>														
Kiefer	B2	3	164 (13)	0.48 (0.02)	340 (34) B	3.02 (0.11) A	1.8 (0.2) D	9.1 (0.7) E	48.7 (0.4) AB	33.3 (0.8) A	7.1 (1.1) A			
Buche	B4	3	239 (11)	0.49 (0.03)	493 (30) A	1.71 (0.01) D	7.1 (0.5) A	30.9 (0.6) A	47.7 (0.8) AB	13.1 (0.3) D	1.2 (0.1) C			
Kiefer/ Buche <sup>3)</sup>	B5	3	236 (30)	0.50 (0.03)	475 (38) A	2.54 (0.07) B	3.5 (0.4) C	16.2 (1.3) D	48.8 (0.2) A	27.0 (1.7) B	4.6 (0.3) B			
Birke	B6	3	267 (8)	0.50 (0.03)	536 (15) A	2.45 (0.08) B	3.7 (0.2) C	22.5 (0.8) C	46.6 (1.4) BC	20.3 (0.3) C	7.0 (1.2) A			
Pappel	B7	3	238 (10)	0.48 (0.01)	496 (8) A	2.21 (0.08) C	4.6 (0.1) B	26.9 (0.6) B	44.5 (0.6) C	18.8 (0.6) C	5.2 (0.7) AE			
<b>Zerfaserungszeitpunkt</b>														
Serie A	A2	10	222 (14)	0.49 (0.01)	456 (21) A	2.64 (0.08) B	2.2 (0.2) A	11.7 (0.8) A	54.5 (1.2) A	27.0 (1.4) B	4.7 (0.5) B			
Serie B	B2	3	164 (13)	0.48 (0.02)	340 (34) B	3.02 (0.11) A	1.8 (0.2) B	9.1 (0.7) B	48.7 (0.4) B	33.3 (0.8) A	7.1 (1.1) A			

Dargestellte Werte: Mittelwert (± Standardabweichung) homogene Gruppe<sup>4)</sup>, wenn nicht anders angegeben: Holzart = Kiefer, Kochtemperatur = 170 °C, Kochdauer = 4 min, Stoffauslass = radial, Mahlscheibenabstand (MSA) = 0.15 mm; <sup>1)</sup> MSA: 0.15 mm; <sup>2)</sup> MSA: 0.2 mm; <sup>3)</sup> Mix aus Kiefer und Buche (50/50) <sup>4)</sup> Gruppen mit dem gleichen Buchstaben unterscheiden sich auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0.05$  statistisch nicht voneinander

**Tabelle 4:** Platteneigenschaften

Einflussgröße	Faser	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	Querzug- festigkeit (IB) (N/mm <sup>2</sup> )	Dickenquellung (TS)		Wasseraufnahme (WA)		E-Modul (MOE) (N/mm <sup>2</sup> )	Biege- festigkeit (MOR) (N/mm <sup>2</sup> )	Abhebe- festigkeit (SS) (N/mm <sup>2</sup> )
				2 h	24 h	2 h	24 h			
Kochtemperatur/-dauer										
a)	A1	678 (17)	0.90 (0.15) C	10.0 (2.5) C	17.1 (1.3) C	68.0 (9.1) B	89.4 (6.5) C	2834 (143) B	31.7 (1.4) B	1.70 (0.20) C
	A2	677 (16)	0.72 (0.11) B	7.7 (2.5) B	16.2 (1.2) B	59.4 (9.6) AB	83.2 (6.7) B	2674 (122) AB	32.0 (1.9) B	1.55 (0.16) B
	A3	687 (24)	0.37 (0.05) A	4.8 (1.7) A	7.7 (0.5) A	52.5 (16.5) A	68.3 (8.0) A	2573 (215) A	21.5 (2.0) A	1.31 (0.16) A
b)	A4	666 (24)	0.81 (0.09) B	13.6 (0.7) C	18.0 (0.7) C	82.3 (8.0) C	93.8 (6.2) B	2473 (145) A	30.9 (2.0) B	1.65 (0.16) AB
	A2	677 (16)	0.72 (0.11) A	7.7 (2.5) A	16.2 (1.2) B	59.4 (9.6) A	83.2 (6.7) A	2674 (122) B	32.0 (1.9) B	1.55 (0.16) A
	A5	684 (23)	0.78 (0.05) AB	9.8 (1.1) B	14.7 (0.5) A	69.4 (8.9) B	84.5 (5.3) A	2604 (179) AB	28.9 (1.9) A	1.72 (0.12) B
c)	A6	670 (25)	0.37 (0.15) A	5.4 (1.6) A	8.4 (0.6) B	57.4 (15.6) A	74.8 (10.1) B	2263 (148) B	20.7 (2.1) A	1.10 (0.28) A
	A3	687 (24)	0.37 (0.05) A	4.8 (1.7) A	7.7 (0.5) A	52.5 (16.5) A	68.3 (8.0) A	2573 (215) A	21.5 (2.0) A	1.31 (0.16) B
d)	A2	677 (16)	0.72 (0.11) B	7.7 (2.5) B	16.2 (1.2) B	59.4 (9.6) A	83.2 (6.7) B	2674 (122) B	32.0 (1.9) B	1.55 (0.16) B
	A6	670 (25)	0.37 (0.15) A	5.4 (1.6) A	8.4 (0.6) A	57.4 (15.6) A	74.8 (10.1) A	2263 (148) A	20.7 (2.1) A	1.10 (0.28) A
e)	A7	697 (25)	0.79 (0.12) A	14.0 (1.1) B	17.6 (1.3) B	73.6 (5.4) A	85.1 (5.4) A	2367 (268) A	23.6 (3.8) A	1.48 (0.32) A
	A8	685 (16)	0.97 (0.08) B	12.4 (0.3) A	16.5 (0.3) A	74.1 (4.4) A	85.4 (3.7) A	2503 (188) A	26.1 (2.6) A	1.95 (0.27) B
Stoffauslass										
radial <sup>1)</sup>	A2	677 (16)	0.72 (0.11) B	7.7 (2.5) A	16.2 (1.2) A	59.4 (9.6) A	83.2 (6.7) A	2674 (122) B	32.0 (1.9) B	1.55 (0.16) B
tangential <sup>2)</sup>	A9	663 (22)	0.53 (0.13) A	10.4 (1.9) B	16.4 (1.5) A	73.0 (12.7) B	93.1 (6.8) B	2452 (179) A	28.7 (3.6) A	1.25 (0.28) A
Mahlscheibebenabstand										
0.06 mm	B1	653 (30)	0.55 (0.04) A	6.5 (2.5) B	15.6 (0.6) B	67.5 (15.6) B	96.1 (8.5) B	2591 (307) AB	28.9 (3.3) B	1.59 (0.14) A
0.15 mm	B2	661 (22)	0.65 (0.08) B	2.6 (1.4) A	15.8 (0.3) B	45.8 (11.2) A	95.9 (6.7) B	2808 (227) B	31.7 (2.6) B	1.64 (0.16) A
0.6 mm	B3	681 (30)	0.65 (0.07) B	8.6 (0.8) C	14.3 (0.3) A	69.8 (10.7) B	84.4 (7.1) A	2396 (304) A	24.1 (3.2) A	1.65 (0.19) A
Holzart										
Kiefer	B2	661 (22)	0.65 (0.08) C	2.6 (1.4) A	15.8 (0.3) B	45.8 (11.2) A	95.9 (6.7) C	2808 (227) B	31.7 (2.6) C	1.64 (0.16) C
Buche	B4	683 (26)	0.58 (0.04) B	10.7 (1.3) B	16.0 (0.3) B	66.7 (10.7) B	84.5 (6.8) AB	2636 (291) AB	27.1 (3.5) AB	1.63 (0.20) C
Kiefer/Buche <sup>3)</sup>	B5	675 (22)	0.55 (0.05) B	10.0 (1.0) B	15.9 (0.6) B	68.5 (8.5) B	86.2 (6.4) BC	2825 (273) B	28.8 (4.4) ABC	1.53 (0.18) BC
Birke	B6	665 (23)	0.44 (0.07) A	10.1 (3.5) B	19.4 (1.6) C	62.1 (17.5) B	89.5 (10.7) BC	2874 (341) B	29.4 (4.7) BC	1.40 (0.27) AB
Pappel	B7	659 (28)	0.39 (0.04) A	4.4 (2.4) A	13.0 (3.1) A	41.5 (15.4) A	75.1 (17.5) A	2456 (249) A	24.8 (2.5) AB	1.26 (0.13) A
Zerfaserungszeitpunkt										
Serie A	A2	677 (16)	0.72 (0.11) B	7.7 (2.5) B	16.2 (1.2) A	59.4 (9.6) B	83.2 (6.7) A	2674 (122) A	32.0 (1.9) A	1.55 (0.16) A
Serie B	B2	661 (22)	0.65 (0.08) A	2.6 (1.4) A	15.8 (0.3) A	45.8 (11.2) A	95.9 (6.7) B	2808 (227) A	31.7 (2.6) A	1.64 (0.16) A

Dargestellte Werte: Mittelwert (± Standardabweichung) homogene Gruppen<sup>4)</sup>; IB, TS, WA, SS: n = 18; MOE, MOR: n = 12; wenn nicht anders angegeben: Holzart = Kiefer, Kochtemperatur = 170 °C, Kochdauer = 4 min, Stoffauslass = radial, Mahlscheibebenabstand (MSA) = 0.15 mm; <sup>1)</sup> MSA: 0.15 mm; <sup>2)</sup> MSA: 0.2 mm; <sup>3)</sup> Mix aus Kiefer und Buche (50/50) <sup>4)</sup> Gruppen mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich auf einem Signifikanzniveau von α = 0.05 statistisch nicht voneinander

## 4 Industrierversuche

Mit dem Ziel, neben der Charakterisierung von Faserstoffen aus der industriellen Produktion gleichzeitig die Robustheit, Tauglichkeit und Akzeptanz des Messsystems in der Praxis zu testen, war das Gerät in der Zeit vom 8. August bis 26. November 2013 im MDF-Werk der Glunz AG in Meppen aufgestellt.



**Abbildung 14:** Standort des Fasermessgerätes im MDF-Werk der Glunz AG in Meppen.

Das Werk Meppen eignete sich für diesen ersten Praxistest im besonderen Maße, da hier ein breites Spektrum an Faserplatten - von Holzfaserdämmplatten über MDF bis hin zu Hochdichten Faserplatten - hergestellt wird. Folglich werden eine Vielzahl verschiedener Faserstoffqualitäten hergestellt, anhand deren Charakterisierung das Potential des Messgerätes aufgezeigt werden kann.

### 4.1 Ausgangssituation im Werk Meppen

#### 4.1.1 Steuerung der Faserstoffqualität

Wie in allen Holzwerkstoffwerken unterliegt auch die Faserplattenproduktion am Standort Meppen starken ökonomischen Zwängen, d.h. es muss durchweg mit einem möglichst geringem Input (niedriger Energieeinsatz und kostengünstiges Rohmaterial) ein den individuellen Kundenanforderungen entsprechendes Produkt erzeugt werden. Im Bezug auf die jeweils optimale Einstellung

der hierfür erforderlichen Faserstoffqualität können verschiedene Stellgrößen zum Einsatz kommen:

**Mahlscheibenabstand:** Ein wesentlicher Kostenfaktor bei der Faserplattenherstellung ist der Verbrauch elektrischer Energie durch den Refiner, die in Abhängigkeit zur Menge des durchgesetzten Holzes, der eingesetzten Holzart (bzw. dem Holzartenmix) sowie dem Mahlscheibenabstand steht. Speziell die Wahl des Mahlscheibenabstandes hat einen wesentlichen Einfluss auf die Grob- bzw. Feinheit eines Faserstoffes und somit die erzielbare Plattenqualität. Beispielsweise erfordert die Erzeugung von feinen Faserstoffen die Einstellung eines kleinen Mahlspaltes, was einen Anstieg des Energiebedarfes für den Refinerbetrieb zur Folge hat. Der Mahlscheibenabstand ist somit eine maßgebliche Einflussgröße auf die Faserstoffqualität, lässt sich jedoch aus technischen Gründen nicht direkt messen. Selbst über die Bildung der Differenz zwischen Ausgangsposition und der aktueller Position der Rotorscheibe-tragenden Refinerkomponente, die zur Justierung des Mahlspaltes gegenüber dem Stator verfahren werden kann, ist die Breite des Mahlspaltes aufgrund der kontinuierlichen Abnutzung des Refinerscheibenprofils nicht umfassend herzuleiten. Lediglich über die auf einer Skale ablesbare Ist-Position der Rotorscheibe (z.B. frische Mahlscheibe 22 mm, stark abgenutzte Mahlscheibe 11 mm) lässt sich der Zustand des Refinerscheibenprofils bzw. der Abnutzungsgrad der Refinerscheibe abschätzen und so der nächsten Termin für einen Mahlscheibenwechsels planen. In der Praxis wird daher der Zerfaserungsprozess indirekt über den Zusammenhang von Mahlscheibenabstand und Stromaufnahme des Refiners gesteuert. Die Stromaufnahme wird hierbei relativ zum Holzdurchsatz betrachtet (spezifische Refinerleistung in kWh/t), um mit einer um den Einfluss der zu zerfasernden Holzmasse bereinigten Größe umgehen zu können. Nebeneffekte der unterschiedlichen Beladungsmenge, wie beispielsweise veränderte Zerfaserungsvorgänge (reine Zerfaserung durch Holz-an-Metall vs. zusätzliche Zerfaserung durch Holz-an-Holz) bleiben hierbei jedoch unberücksichtigt. Der Zusammenhang von Mahlscheibenabstand und spezifischer Refinerleistung kann anhand von Abbildung 15 nachvollzogen werden. Eine detaillierte Erklärung der Grafik erfolgt in Kapitel 4.5.3.2.

**Kochparameter:** Im Allgemeinen wird über die Justierung der Kochparameter dem individuellen Zustand der eingesetzten Hackschnitzel (Lagerdauer, Feuchtigkeit, Temperatur) Rechnung getragen, aber auch der Erweichungsgrad des Lignins gesteuert. Im vorliegenden Fall ist jedoch die verfügbare Dampfmenge limitiert, was eine gezielte Einstellung insbesondere feiner Faserstoffqualitäten über die Kochtemperatur erschwert und von nachgelagerten Aggregaten (Refiner) kompensiert werden muss. Die Verringerung der Kochtemperatur zur gezielten Erzeugung grober und starrer Fasern kann hingegen vorgenommen werden. Die Kochdauer lässt sich grundsätzlich über das Zusammenspiel von Kocherfüllhöhe und Holzdurchsatz variieren.

**Holzart:** Die Nutzung der Einflusskomponente Holzart auf die Produktionskosten sowie die Faserstoffqualität unterliegt engen Grenzen. Aus technologischen Gründen muss für bestimmte Plattenqualitäten ausschließlich entrindetes Nadelholz eingesetzt werden. Andere Zielqualitäten tolerieren wiederum den Einsatz gewisser Anteile nicht entrindeten Holzes, bis hin zum Einsatz

großer Anteile verschiedener Niedrigpreis-Segmente. Die gezielte Verwendung von Laubhölzern zur Einstellung bestimmter Faserstoffqualitäten hat im vorliegenden Fall keine praktische Bedeutung.

#### 4.1.2 Beurteilung der Faserstoffqualität

Die Faserstoffqualität, also die Tauglichkeit des erzeugten Faserstoffes für eine bestimmte Zielqualität, wird im Werk Meppen über verschiedene Kriterien beurteilt:

- Schüttdichte des Faserstoffes
- visuelle und haptische Begutachtung durch den Maschinenführer
- optische Begutachtung der fertigen Faserplatte, insbesondere deren Oberfläche.

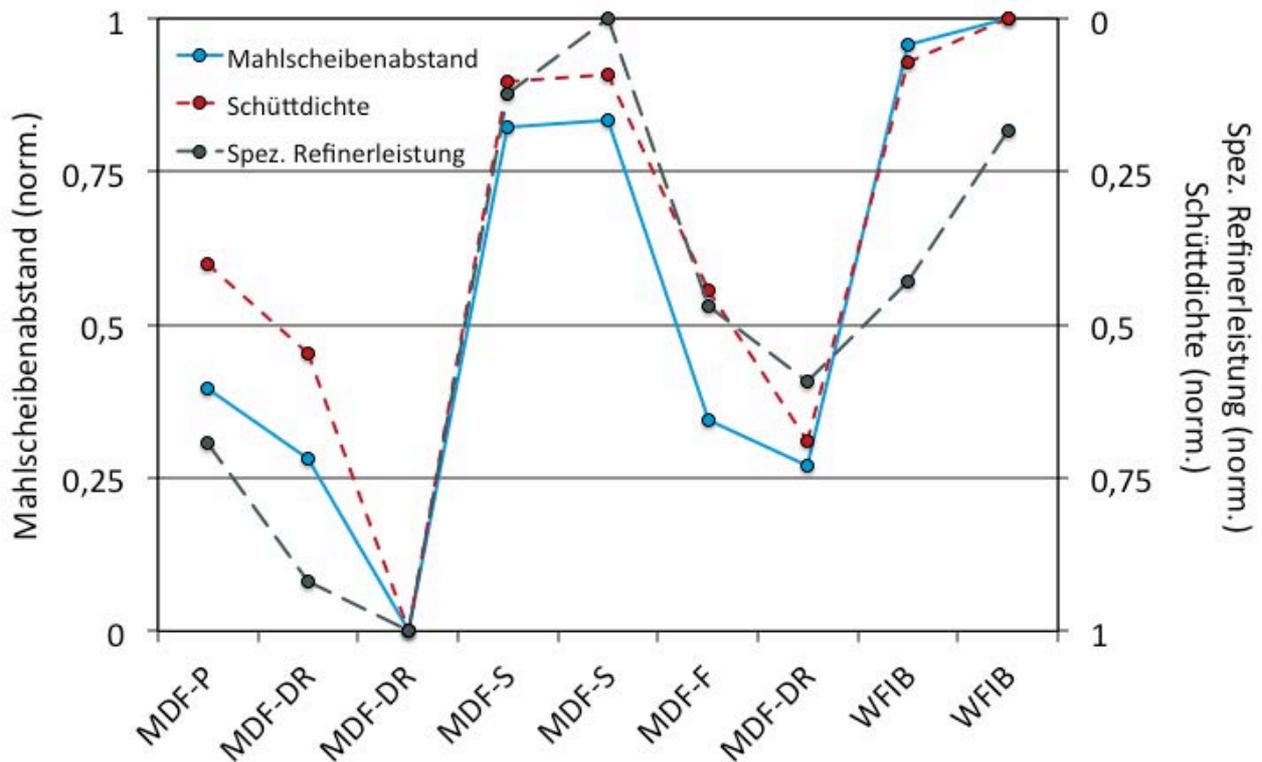
Über die visuelle und haptische Begutachtung des Faserstoffes sowie der fertigen Faserplatte durch den Schichtführer wird sichergestellt, dass im Fall von feinen Faserstoffen keine störenden Faserbündel vorhanden sind, die sich im Endprodukt oder bei dessen Weiterverarbeitung störend auswirken. Diese Art der Prozesskontrolle muss zwar als subjektiv und aus Sicht der Messtechnik als nicht reproduzierbar bewertet werden, ist in der Praxis jedoch hinreichend präzise und erfüllt zielführend ihren Zweck.

Die Schüttdichte des Faserstoffes (Quotient aus dem Schüttgewicht ( $\text{kg/m}^2$ ) und der Schütthöhe<sup>5</sup> als Divisor) auf dem Formband nach der Vliesbildung wird als Maß für die Feinheit des Faserstoffes herangezogen. Hierbei wird der Zusammenhang von Mahlpaltbreite und Intensität der Zerfaserung genutzt. Mit zunehmender Intensität der Zerfaserung (geringere Mahlpaltbreite) wird ein feinerer Faserstoff erzeugt, dessen Schüttdichte steigt. Der Zusammenhang von Mahlscheibenabstand, (spezifischer) Refinerleistung und Schüttdicht lässt sich anhand von Abbildung 15 nachvollziehen. Eine detaillierte Erklärung der Grafik erfolgt in Kapitel 4.5.3.2.

Auf Basis der Ergebnisse der Faserstoff-Qualitätsbeurteilung (Gutachten des Schichtführers, Bestimmung der Schüttdichte) wird im Maschinenleitstand die Faserstoffqualität durch Nachjustierung des Mahlscheibenabstandes gesteuert.

---

<sup>5</sup> ermittelt über die Einstellung der Scalper-Walze



**Abbildung 15:** Normierte Darstellung von Mahlscheibenabstand, Refinerleistung und Schüttdichte einer zeitlich enggestaffelten Entnahmereihe von Faserstoffproben

### 4.2 Untersuchtes Faserstoffspektrum

Für die im Rahmen der Industrierversuche beabsichtigte Faserstoffcharakterisierung wurden sechs Faserplattentypen ausgewählt, für deren Herstellung jeweils individuell als optimal eingeschätzte Faserstoffqualitäten produziert werden. Hierbei wurde darauf geachtet, mit der Auswahl der Faserplattentypen einerseits das Spektrum an Faserstoffqualitäten (grob bis fein) abbilden zu können und andererseits, anhand ähnlicher Faserstoffqualitäten, die Sensitivität des Messgerätes zu überprüfen.

Als Vertreter von Faserplattentypen, für deren Herstellung grobe Faserstoffe verwendet werden, wurden eine Holzfaserdämmplatte (engl.: Wood Fiber Insulation Board; kurz: WFIB) (Faser F1) sowie eine Hochdichte Faserplatte (engl.: High-density Fiberboard; kurz: HDF) (Faser F6) ausgewählt. Hierbei wird im Fall der Holzfaserdämmplatte aus technologischen Gründen eine grobe Faser benötigt, um so einen sehr voluminösen Faserkuchen zu streuen, der trotz geringer Verdichtung in der Heißpresse einen ausreichenden Gegendruck aufbaut und so die Herstellung einer Platte mit geringer Dichte ermöglicht. Im Fall der HDF ist die Grobheit der Faser ein Ergebnis der möglichst energie- und somit kostensparenden Zerfaserung (großer Mahlscheibenabstand). Als Pendant hierzu wurde eine MDF in Tiefräsqualität (engl.: Deep Router Grade MDF; kurz: MDF-DR) (Faser F5) ausgewählt, für deren Herstellung feine Fasern benötigt werden, um Fräskan-

ten dicht und lackierbar zu gestalten. Als eine vom Anwendungsspektrum universeller aufgestellte und von der Faserstoffqualität zwischen grob und fein einzuordnenden Faserplatte, wurde eine MDF in Möbelbauqualität (engl.: Furniture Grade MDF; kurz: MDF-F) (Faser F4) aufgenommen. Diesem Plattentyp recht ähnlich, jedoch vom Eigenschaftsprofil stärker auf die Anforderungen der Paneel-Industrie ausgerichtet (Beschichtung mit dekorativen Folien), wurde eine MDF in Paneelqualität (engl.: Paneling Grade MDF; kurz: MDF-P) (Faser F3) in die Untersuchungen einbezogen. Anhand von F3 und F4 sollte die Sensitivität des Messgerätes demonstriert werden. Über die Faser F2 der MDF für aussteifende Beplankungen (engl.: Structural Fiberboard; kurz: MDF-S) sollte das Spektrum der MDF in Richtung der geringeren Dichten abrunden werden. In Tabelle 5 werden die untersuchten Faserstoffe (F1 - F6) den Faserplattentypen zugeordnet sowie Plattendichte, verwendeter Holzmix und Plattendicke der ausgewählten Faserplattentypen angegeben.

**Tabelle 5:** Zuordnung der charakterisierten Faserstoffqualitäten zu den Faserplatten-Zielprodukten, Charakterisierung der Faserplattentypen über Plattendichte und dem der Faserstoffherstellung zugrundeliegendem Holzmix, sowie Angabe der Spanne der Plattendicke der Zielprodukte.

Faser	Zielprodukt		Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	Holzmix (NH/LH)	Dicke (mm)
F1	Holzfaserdämmplatte	(WFIB)	230	100/0	40-80
F2	MDF für aussteifende Beplankungen	(MDF-S)	565	55/45	16
F3	MDF in Paneelqualität	(MDF-P)	710	60/40	9-19
F4	MDF in Möbelbauqualität	(MDF-F)	745	60/40	12-19
F5	MDF in Tieffräsqualität	(MDF-DR)	790	100/0	13-22
F6	Hochdichte Faserplatte	(HDF)	900	80/20	8

NH = Nadelholz, LH = Laubholz

### 4.3 Versuchsdesign

Über einen Zeitraum von 100 Tagen (8. August bis 26. November 2013) wurden 50 Faserstoffproben entnommen und vermessen. Aufgrund der Durchführung von drei Wiederholungsmessungen je Faserstoffprobe wurden insgesamt 150 Messungen mit dem Messgerät durchgeführt. Von den 50 untersuchten Faserstoffproben entfallen

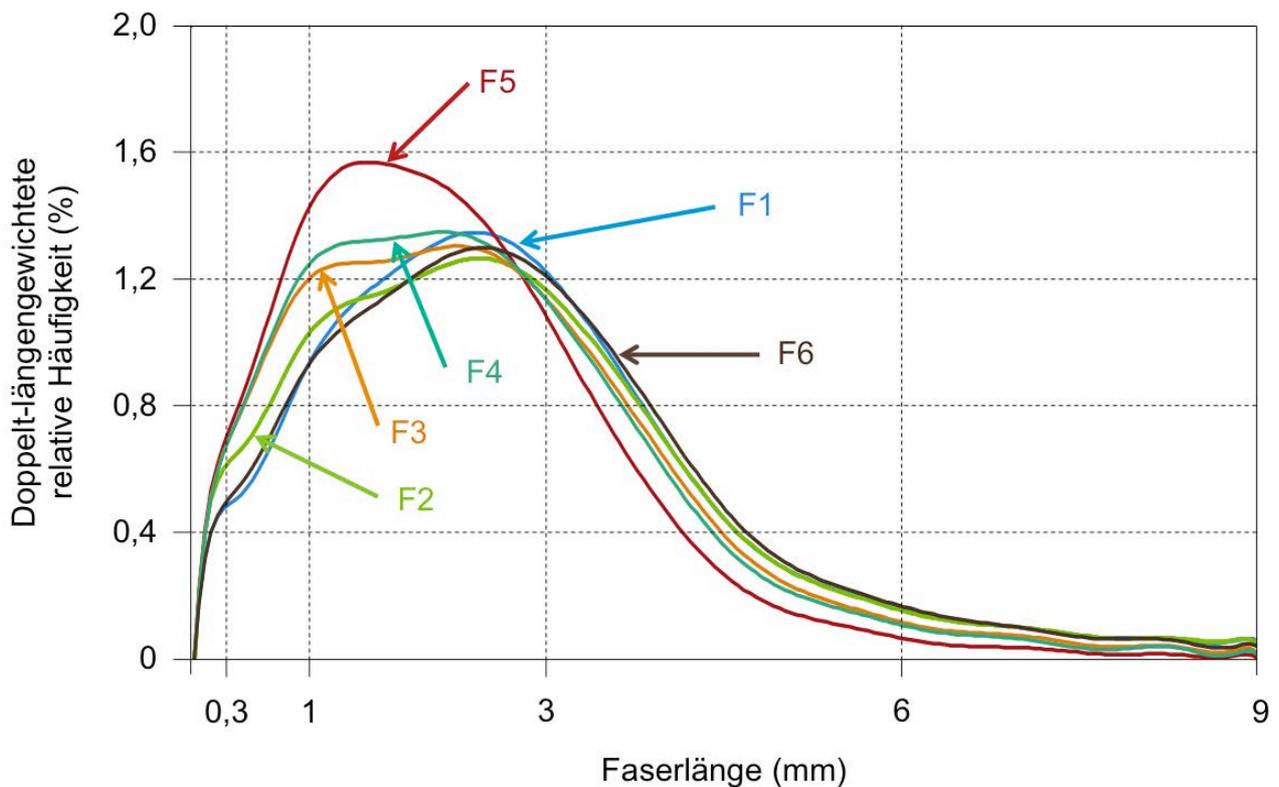
- 11 auf F1,
- 12 auf F2,
- 12 auf F3,
- 6 auf F4,
- 5 auf F5 und
- 4 auf F6.

Der Versuch erstreckte sich über drei Mahlscheibenzyklen. Alle Mahlscheiben waren identisch, d.h. Hersteller und Profil der Mahlscheiben wurden nicht verändert. Von Seiten der Anlagenführer wurden keine gezielten Versuche in Bezug auf Faserstoffqualität gefahren. Es wurde lediglich der laufende Betrieb beprobt, sodass die ausgewählten Faserstoffqualitäten charakterisiert und deren Variabilität, auch über die drei Mahlscheibenzyklen hinweg, dargestellt werden können.

Mit dem Ziel Zusammenhänge zwischen den erzeugten Faserstoffqualitäten und den gewählten Prozessparametern zu identifizieren, wurde die Zusammensetzung des jeweilig eingesetzten Hackschnitzelmixes (Anteile von Nadel- und Laubholz; siehe Tabelle 5), die Vorheiz-, Koch-, und Refinereinstellungen, der Holzdurchsatz, die Formstraßenparameter (z.B. Schüttdichte) sowie die erzielten Platteneigenschaften erfasst.

### 4.4 Charakterisierung der Faserstofftypen

Aus Gründen der Wahrung produktspezifischer Interna, wird die Charakterisierung der Faserstoffe hier vornehmlich über die graphische Darstellung der doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeitsverteilung als geglättetes Häufigkeitspolygon (Abbildung 16) vorgenommen. Mit dem Ziel ein möglichst generelles Bild der auf den jeweiligen Plattentyp optimierten Faserstoffqualität zu geben, werden nicht die Ergebnisse der Einzelmessungen (50 Stück), sondern ein Querschnitt über alle Messungen einer Ziel-Faserstoffqualität dargestellt.



**Abbildung 16:** Darstellung der doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeitsverteilung als geglättetes Häufigkeitspolygon der untersuchten Fasertypen.

Die Betrachtung von Abbildung 16 legt nahe, die Faserstoffe grob in drei Gruppen zu einteilen:

- Gruppe 1: F5
- Gruppe 2: F3 und F4
- Gruppe 3: F1, F2 und F6.

Innerhalb der untersuchten Faserstoffe wurde F5 (Gruppe 1) als feinsten Faserstoff, die Fasern der Gruppe 3 als grössten Faserstoffe bestimmt. Die Fasern der Gruppe 2 sind zwischen Gruppe 1 und 3 einzuordnen. Dieses Messergebnis zeigt zum einen, dass für die verschiedenen Plattentypen tatsächlich unterschiedliche Faserstoffqualitäten hergestellt werden und belegt zum anderen, dass sich die bisher übliche haptische und visuelle Beurteilung der Faserstoffqualität durch den Anlagenfahrer (subjektiv) mit einem Messgerät (objektiv) darstellen lässt. Weiter werden die Annahmen bezüglich der Faserstoffqualität bestätigt, die bei der Auswahl der Faserstoffe für diese Untersuchung getroffen wurden:

- F1 und F6 sind besonders grobe Faserstoffe
- F5 ist ein besonders feiner Faserstoff
- Die Faserstoffqualität von F3 und F4 ist zwischen denen der eben genannten groben und feinen Faserstoffe einzuordnen

- Die Qualität der Faserstoffe F3 und F4 ist ähnlich bzw. unterscheidet sich nur geringfügig voneinander
- Die Holzfasерplatte für aussteifende Beplankungen
  - a) ist den mitteldichten Faserplatten zuzuordnen, was sich über die ähnliche Charakteristik des geglätteten Häufigkeitspolygons von F2 mit denen der Faserstoffe in Gruppe 2 nachvollziehen lässt: Andeutung eines ersten Peaks bei 1 mm Faserlänge; Hauptpeak bei 2 mm Faserlänge,
  - b) spannt das Spektrum der mitteldichten Faserplatten in Richtung der groben Fasern auf: F2 ist deutlich gröber als F3 und F4 und ähnelt in seiner Grobheit F1 und F6.

Bei der Betrachtung der (hier nicht dargestellten) Schwankungsbreite des geglätteten Häufigkeitspolygons (Standardabweichung/Vertrauensbereich; siehe Kapitel 2.4.4) für den über alle Messungen einer Ziel-Faserstoffqualität gebildeten Querschnitt wird deutlich, dass sich die Faserstoffqualitäten der Gruppen 1-3 sehr wohl signifikant voneinander unterscheiden, Qualitätsunterschiede innerhalb der Gruppen jedoch bei dieser Betrachtung nicht nachzuweisen sind. Die Schwankungsbreite der drei Wiederholungen einer Faserstoffvermessung fällt hingegen deutlich geringer aus.

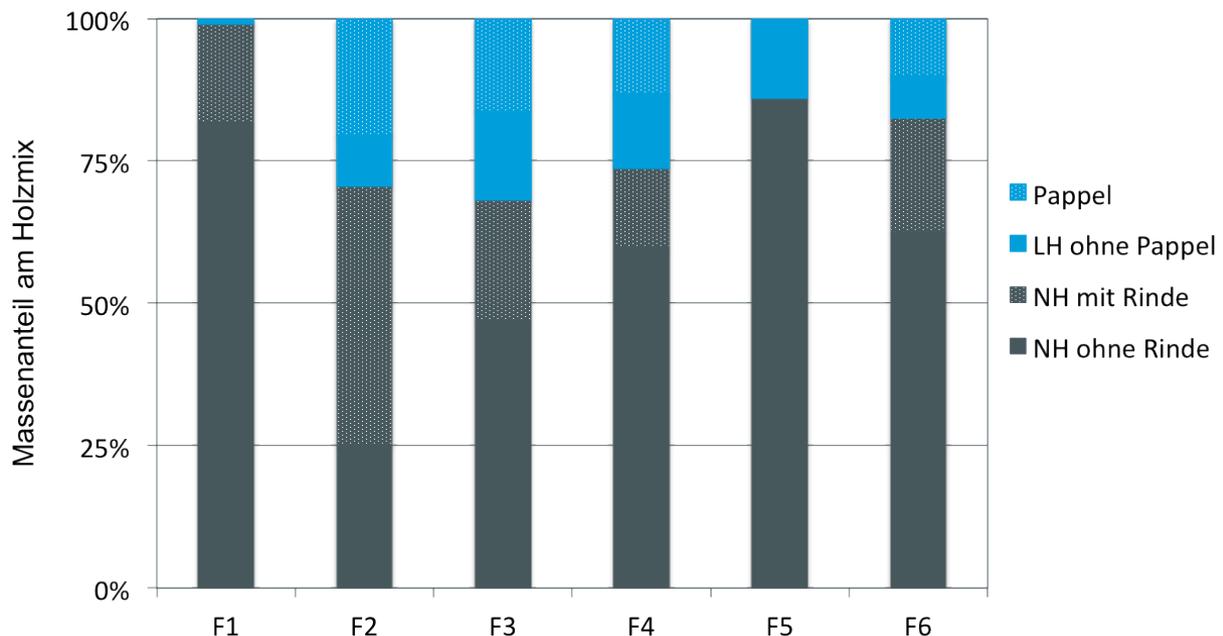
## 4.5 Auswertung der aufgenommenen Prozessparameter mit Blick auf die beabsichtigte Herstellung verschiedener Faserplattentypen bzw. Faserstoffqualitäten

### 4.5.1 Hackschnitzelmix

Die Holzartenzusammenstellung für die Erzeugung bestimmter Faserstoffqualitäten bzw. Faserplattenqualitäten ist das Ergebnis einer Abwägung von Rohstoffkosten auf der einen Seite und technologischen Anforderungen an den Faserstoff auf der anderen Seite. Dies wird insbesondere an den Faserstoffen F1 (WFIB) und F5 (MDF-DR) deutlich (Abbildung 17). Im Fall von F1 wird aus technologischen Gründen nahezu nur Nadelholz für die Faserstoffherstellung verwendet, da grobe und steife Fasern bzw. ein Faserstoff benötigt wird, der voluminös ist und bei der Verdichtung viel Gegendruck aufbaut. Im Fall von F5 werden keine Rindenanteile toleriert, da diese im späteren Produkt (MDF-DR) zu Schwierigkeiten führen. Alle übrigen MDF-Faserstoffqualitäten werden mit ähnlichen Anteilen Laubholz gefahren, wobei auch hier in Abhängigkeit der Sensibilität der späteren Anwendung der MDF unterschiedliche Anteile an Laubholz und insbesondere Rindenanteilen toleriert werden.

Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Hackschnitzelmix und den in Abbildung 16 dargestellten doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeitsverteilung für die Faserstoffe F1 bis F6 ist nur begrenzt zu erkennen. Vermutet wird im Fall eines vermehrten Laubholzeinsatzes aufgrund der Anatomie von Laubholzzellen stets eine Abnahme der mittleren Faserlänge bzw. Verschie-

bung der Häufigkeitsverteilung in Richtung kürzerer Fasern. Dies ist bedingt für die Faserstoffe F2, F3 und F4 zu erkennen. Im Fall des sehr feinen Faserstoffes F5 wird die Feinheit nicht über den Zusatz von Laubholz, sondern über den geringen Mahlscheibenabstand realisiert.



**Abbildung 17:** Massenanteile von Pappel, Laubholz (LH) ohne Pappel, Nadelholz (NH) mit Rinde und NH ohne Rinde am Holzmix für die Faserstoffe F1-F6.

### 4.5.2 Vorheiztemperatur und Kochparameter

**Vorheiztemperatur:** Die Vorheiztemperatur wurde über den Versuchszeitraum nahezu konstant auf 105 °C gehalten.

**Kochdauer:** Die Kochdauer, sprich die Verweilzeit der Hackschnitzel im Kocher, ergibt sich aus der Füllhöhe (theoretisch 0 bis 100 %) und dem Holzdurchsatz, d.h. bei gleicher Füllhöhe jedoch sinkendem Holzdurchsatz wird länger gekocht bzw. bei gleicher Holzdurchsatzleistung müsste die Füllhöhe verringert werden, um die Kochdauer zu verringern. Im Fall der beprobten Faserstoffe wurde die Kochdauer annähernd konstant gehalten und lediglich für die Erzeugung der Faser F2 etwas niedriger angesetzt.

**Kochtemperatur/-druck:** Mit Ausnahme der Herstellung von Faser F1 ( $\emptyset$  7,6 bar) wurde der Kochdruck im Mittel mit 9,3 bar<sup>6</sup> gefahren. Der Grund hierfür ist in der Limitierung der zur Verfügung stehenden Dampfmenge zu suchen (stets Maximalabnahme) und weniger in der gezielten Nutzung des Kochdrucks bei der Einstellung einer bestimmten Faserstoffqualität. Im Fall von Faser F1 hat der reduzierte Kochdruck hingegen schon die Erzeugung eines groben und spröden Faserstoffes zum Ziel.

### 4.5.3 Mahlscheibenabstand

#### 4.5.3.1 Betrachtung über alle Faserstoffproben

Der Mahlscheibenabstand kann nicht direkt gemessen, sondern lediglich über die spezifische Refinerleistung abgeschätzt werden (siehe Kapitel 4.1.1). Bei der Betrachtung aller Faserstoffproben wurde die spezifische Refinerleistung (ohne Faser F5) mit 93 kWh/t<sup>7</sup> gemittelt. Signifikant höher war die spezifische Refinerleistung bei der Herstellung der Faser F5 (132 kWh/t). Das Herausstechen der Faser F5 war zu erwarten, da für die Herstellung der MDF-DR ein besonders feiner Faserstoff benötigt wird, wie auch schon die Charakterisierung der Faserstoffe ein Kapitel 4.4 aufzeigen konnte. Fehlende deutliche Unterschiede zwischen den übrigen Faserstoffen erstaunen zunächst, lassen sich jedoch mit der Überlagerung von Nebeneffekten unterschiedlicher Refinerbeladung und der Verwendung unterschiedlicher Hölzer (Nadel- und Laubholz) erklären.

#### 4.5.3.2 Betrachtung einer zeitlich enggestaffelten Entnahmereihe von Faserstoffproben

Entgegen der Betrachtung der gemittelten Refinerleistung aller Faserstofftypen, die in Ermangelung direkter Messwerte zur Abschätzung des Mahlscheibenabstandes herangezogen werden müssen, lässt sich der Einfluss des Mahlscheibenabstandes anhand einer zeitlich enggestaffelten Entnahmereihe von Faserstoffproben, die sich durch den wiederholten Wechsel von feinen und groben Faserstoff-Zielqualitäten (markierter Bereich in Abbildung 18) auszeichnet, herausarbeiten. Hierfür wurde anhand der Dauer des Mahlscheibenzyklus sowie der Anfangs- und Endposition der Rotorscheibe-tragenden Refinerkomponente die mittlere Abnutzung des Refinerscheibenprofils berechnet<sup>8</sup>. Die Differenz einer jeden Rotorscheibenposition zur Rotorscheibenposition

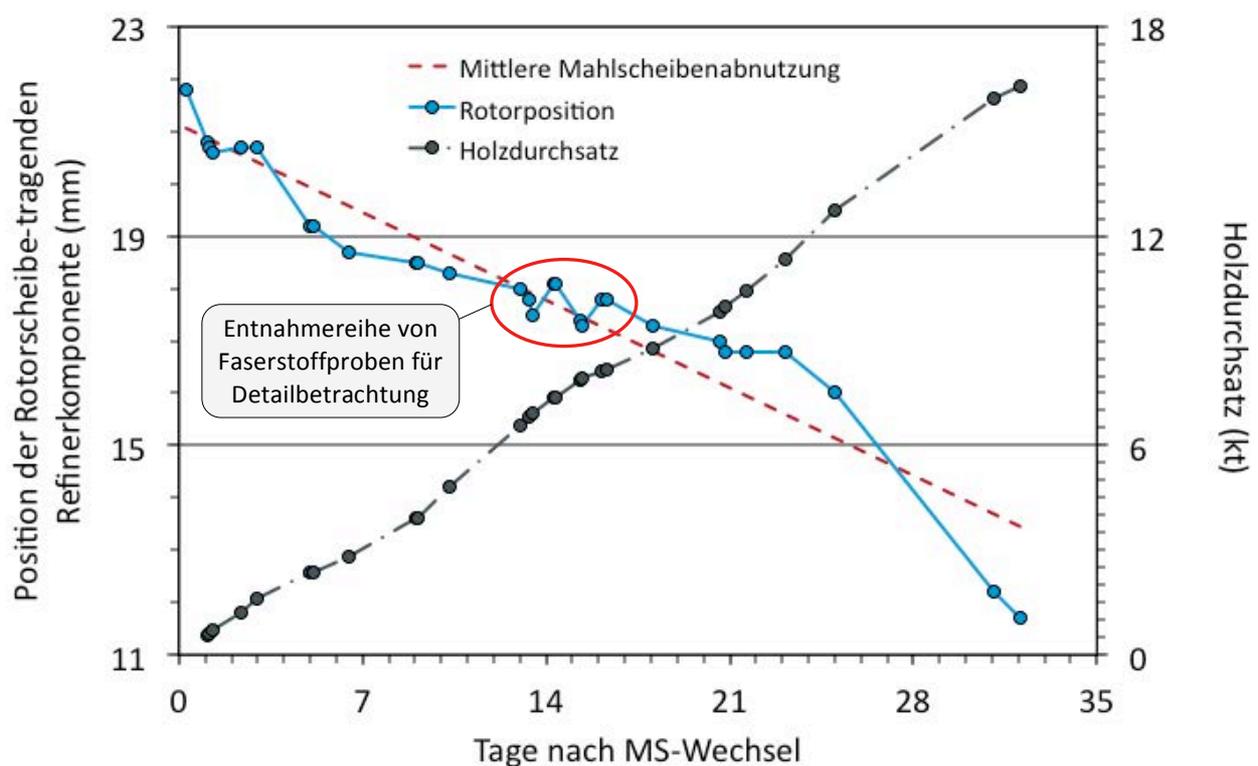
---

<sup>6</sup> Stabw: 0,43 bar; min: 8,2 bar; max: 10 bar

<sup>7</sup> ohne F5; Stabw: 12,2 kWh/t

<sup>8</sup>  $(21,1 \text{ mm} - 13,5 \text{ mm}) / (32,06 \text{ d} - 0,28 \text{ d}) = -0,24 \text{ mm/d}$

der ersten Probe der Entnahmereihe wurde gebildet und um die jeweilige Abnutzung bereinigt. Auf diese Weise kann der Mahlscheibenabstand in Relation zum Mahlscheibenabstand der ersten Probe der Entnahmereihe angegeben werden. Da die absolute Breite des Mahlpaltes der ersten Probe der Entnahmereihe jedoch unbekannt ist, wird dieser mit  $x$  und die übrigen Mahlpaltbreiten relativ zu  $x$  angegeben (Tabelle 6). Wird der so erhaltene Datensatz normiert (niedrigster Wert gleich Null, höchster Wert gleich Eins gesetzt), kann der Mahlscheibenabstand zusammen mit der ebenfalls normierten Refinerleistung sowie der Schüttdichte dargestellt werden (Abbildung 15).

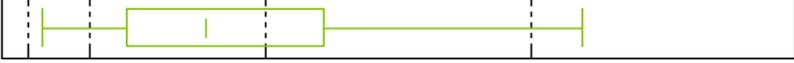


**Abbildung 18:** Darstellung der Position der Rotorscheibe-tragenden Refinerkomponente sowie des Holzdurchsatzes gegenüber der Anzahl an Tagen nach Mahlscheiben (MS)-Wechsel. Markierung der Entnahmereihe von Faserstoffproben für detaillierte Betrachtung. Mittlere Mahlscheibenabnutzung 0,24 mm/d.

Anhand der in Tabelle 6 für eine jede Probe der Entnahmereihe aufgelistete Mahlpaltbreite lässt sich in Kombination mit dem jeweiligen Box-Whisker-Plot der doppelt-längengewichteten relative Summenhäufigkeitsverteilung der Einfluss des Mahlscheibenabstandes auf die Faserstoffqualität nachverfolgen. Im Fall kleiner Mahlscheibenabstände sind die Box-Whisker-Plots stark auf die Seite der kurzen Faser konzentriert, d.h. es wurden feine Faserstoffe produziert, wohingegen im Fall von großen Mahlscheibenabständen die Box-Whisker-Plots deutlich breiter sind; die produzierten Faserstoffe weisen einen größeren Grobanteil auf. Insgesamt lässt sich beobachten, dass

die Faserstoffqualität (hier die Grob- bzw. Feinheit) stets der Änderung des Mahlscheibenabstandes folgt. Beim Vergleich von gleichen Faserstofftypen fällt auf, dass auch bereits leichte Nachjustierungen des Mahlscheibenabstandes die Faserstoffqualität beeinflussen.

**Tabelle 6:** Auflistung der Mahlpaltbreite sowie der Box-Whisker-Plots der doppel-längengewichteten relativen Summenhäufigkeitsverteilung für eine Abfolge (1-9) produzierter Faserstoffe.

Nr.	Ziel-Faser	Ziel-Platte	MSA	Box-Whisker-Plots der doppel-längengewichteten relative Summenhäufigkeitsverteilung
1	F3	MDF-P	$x$	
2	F5	MDF-DR	$x - 0,11$	
3	F5	MDF-DR	$x - 0,38$	
4	F2	MDF-S	$x + 0,41$	
5	F2	MDF-S	$x + 0,42$	
6	F4	MDF-F	$x - 0,05$	
7	F5	MDF-DR	$x - 0,13$	
8	F1	WFIB	$x + 0,54$	
9	F1	WFIB	$x + 0,58$	

0,3    1    3    6    9  
Faserlänge (mm)

MSA = Mahlscheibenabstand

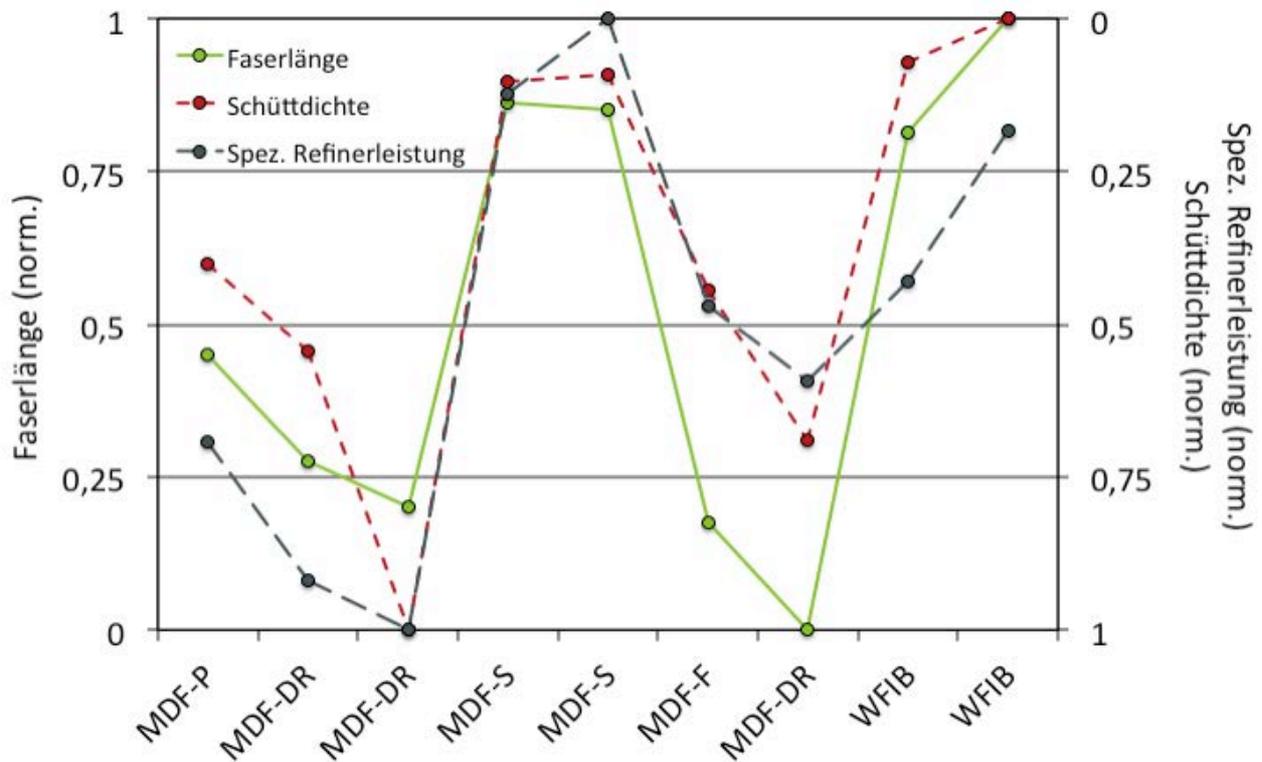
## 4.6 Möglichkeiten der Prozesssteuerung über die Faserstoffqualität

Wie in Kapitel 4.1 aufgezeigt, wird der Zerfaserungsprozess vornehmlich über den Strombedarf des Refiners gesteuert und die Beurteilung des erzeugten Faserstoffes über eine visuelle und haptische Begutachtung von Faserstoff und Faserplatte sowie der Schüttdichte vorgenommen. Auf Basis der Ergebnisse der Faserstoffqualitätsbeurteilung (Gutachten des Schichtführers, Bestimmung der Schüttdichte) wird im Maschinenleitstand der Mahlscheibenabstand unter Beobachtung der Refinerleistung nachjustiert. Im Fall eines Produktwechsels wird nach der Anpassung der Rohstoffkomponenten (Holzmix, Klebharz) versucht die gewünschte Faserstoffqualität über die zuvor für diesen Produkttyp erfolgreich gefahrene Refinerleistungen einzustellen. Anhand der Schüttdichte wird überprüft, ob der Faserstoff im Bereich der Zielqualität liegt. Über die visuelle und haptische Faserstoffbegutachtung kann anschließend die Stromaufnahme soweit gedrosselt werden bis die Qualitätsuntergrenze der Faserplatten-Zielqualität erreicht ist.

Über Abbildung 15 konnte für eine zeitlich enggestaffelte Entnahmereihe von Faserstoffproben der Zusammenhang von Mahlscheibenabstand, Refinerleistung und Schüttdichte veranschaulicht werden. Wichtig hierbei ist anzumerken, dass der Mahlscheibenabstand nicht direkt bestimmt werden kann und im Fall der hier erfolgten Berechnung nur mäßig genau ist. Dies liegt an der nur ungenau möglichen Abschätzung der Mahlscheibenabnutzung sowie der begrenzten Ablesbarkeit der Rotorscheibenposition. Da der Zusammenhang von Refinerleistung und Schüttgewicht aufgrund verschiedener Nebeneffekte nicht direkt korreliert (vergl. Abbildung 15) und die Faserstoffbegutachtung kein objektiv-verlässliches numerisch-fassbares Ergebnis liefert, ist die Steuerung des Produktionsprozesses auf die Expertise erfahrener Maschinenführer angewiesen.

Mit dem Ziel der Kostenreduktion, die insbesondere über Stromeinsparung beim Refinerbetrieb vorgenommen werden kann, ist es notwendig den produzierten Faserstoff charakterisieren und anhand von messbaren Qualitätsmerkmalen optimieren zu können. Die Steuerung des Zerfaserungsprozesses würde so direkt anhand des Endprodukt-beeinflussenden Parameters Faserstoffqualität erfolgen.

In Abbildung 19 wird anhand der bereits beschriebenen Entnahmereihen von Faserstoffproben (Methodenbeschreibung siehe Kapitel 4.5.3.2) anstelle des nur sehr ungenau kalkulierbaren Mahlscheibenabstandes eine der einfachsten Faserstoff-beschreibenden Kenngrößen, die (doppel-längengewichtete) Faserlänge, dargestellt. Bei der Betrachtung dieser Darstellung ist augenscheinlich, dass die gemessenen Faserlängen den Verläufen von Refinerleistung und Schüttdichte über die Produktwechsel folgt und bestätigt anhand von Messwerten den bekannten Zusammenhang von Zerfaserungsparametern und Faserstoffqualität. Die Tatsache, dass die gemessenen Faserlängen nicht vergleichbar eng wie der berechnete Mahlscheibenabstand der Refinerleistung sowie der Schüttdichte folgen (vergl. Abbildung 15) legt die Vermutung nahe, dass die ermittelten Kenngrößen der Faserstoffqualitätsbestimmung unabhängig vom Einfluss von Nebeneffekten wie beispielsweise der Refinerbeladung oder dem verwendeten Holzmix sind und damit eine wesentlich präzisere Kenngröße für die Prozesssteuerung darstellten.



**Abbildung 19:** Normierte Darstellung von doppelt-längengewichteter Faserlänge, Refinerleistung und Schüttdichte einer zeitlich enggestaffelten Entnahmereihe von Faserstoffproben

Diese Vermutung wird durch die im vorherigen Kapitel in Tabelle 6 aufgezeigten Zusammenhänge zwischen dem Mahlscheibenabstand und der doppelt-längengewichteten relative Summenhäufigkeitsverteilung bestätigt. Hier zeigen die unter Nummer 3 (F5) und Nummer 6 (F4) aufgeführten Faserstoffe eine sehr ähnliche Zusammensetzungen (Box-Whisker-Plot), wurden jedoch mit höchst unterschiedlichen Mahlscheibenabständen (x-0,38 mm, x-0,05 mm) und Refinerleistungen (130 kWh/t, 104 kWh/t) produziert.

## 5 Zusammenfassung

MDF ist nach Spanplatte der zweitwichtigste Holzwerkstoff in Europa. Hergestellt wird MDF aus Holzfaserstoff (TMP), der das Produkt eines thermo-mechanischen Aufschlusses von Holz-Hackschnitzeln ist. Ungeachtet der Bedeutung für die Eigenschaften und den Herstellungsprozess von MDF, erfolgt die Bestimmung der Faserstoffqualität auf einem technisch niedrigen Niveau. In Ermangelung adäquater Messgeräte wird derzeit überwiegend eine haptische und visuelle Begutachtung durch den Schichtführer durchgeführt. Dieses Verfahren ist im hohen Maße von der prüfenden Person abhängig und für eine objektiv-gezielte Produkt- und Prozessoptimierung nur begrenzt geeignet. Mit dem Ziel einer numerisch quantifizierbaren Qualitätsbestimmung, wurden in der Vergangenheit verschiedene Techniken zur Partikelgrößenbestimmung versucht zu adaptieren. Die ausbleibende Etablierung eines bestehenden Systems zur TMP-Charakterisierung lässt einen mangelhaften Erfolg schlussfolgern. Die Aussagekraft von Siebmethoden (Siebturm, Luftstrahlsieb) sind begrenzt, da überwiegend die Faserbreite und nicht die Faserlänge erfasst wird. Bildanalyse-basierte Messsysteme aus der Zellstoff- und Papierindustrie erscheinen für die Vermessung von TMP ungeeignet, da die in wässriger Suspension dispergierten Fasern, hier insbesondere grobe Fasern und Faserbündel, zu einem Verstopfen der Durchflusszelle neigen. Eine Anpassung der Durchflusszelle verursacht Probleme bei der Bildakquise. Geräte, mit denen Bildanalyse-basiert rieselfähige Partikel im trockenen Zustand vermessen werden, sind nicht in der Lage die wollig-verknäult vorliegenden Faserstoffe der Bildaufnahme vereinzelt zuzuführen, sodass nur Teile des untersuchten Faserstoffes bei der Bildverarbeitung berücksichtigt werden und der Wert der Ergebnisse so überschaubar bleibt. Selbst eine Lösung dieses Problems mit Hilfe einer Software-basierten virtuellen Nach-Separierung von Faseragglomeraten existierte bislang nicht. Messverfahren, die ein hohes Maß an händischer Probenpräparation erfordern oder eine große Zeitspanne zwischen Probenahme und Ergebnisvorlage besteht, sind für die industrielle Prozesskontrolle als ungeeignet zu bewerten.

Mit der Entwicklung der Hard- und Softwarekomponenten für ein Gerät zur automatisierten Bildanalyse-basierten Vermessung trockener Faserstoffe (insbesondere TMP), wurde im Rahmen zweier Vorgängerprojekte von den Projektpartnern auf den eben beschriebenen Bedarf der Holzwerkstoffindustrie reagiert. Ziel des aktuellen Vorhabens war es, das zuvor entwickelte Messgerät im Laborbetrieb sowie in der industriellen Praxis zu erproben und die Funktionstüchtigkeit zu demonstrieren. Hierfür wurde der Einfluss der Rohstoffheterogenität und der Produktionsbedingungen (insbesondere der Refiner-Parameter) auf die Faserstoffqualität sowie den Einfluss der Faserstoffqualität auf die Eigenschaften von MDF untersucht. Hierfür wurden zunächst Kenngrößen entwickelt, mit denen die Qualität von Faserstoffen beschrieben werden können. Anschließend wurden verschiedene Faserstoffe erzeugt, mit dem zuvor entwickelten Messgerät charakterisiert und die erzielten Ergebnisse mit den Prozessparametern der Faserstofferzeugung sowie den mechanisch-technologischen Eigenschaften der aus diesen Faserstoffen hergestellten MDF in Zusammenhang gestellt. Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse wurden während

der Aufstellung der Messgerätes im Zentrallabor am Standort Meppen des MDF-Herstellers Glunz unter industriellen Bedingungen überprüft.

Im Rahmen der Laborversuche wurden der Mahlscheibenabstand, die eingesetzte Holzart sowie die Kochbedingungen als die wesentlichen Einflussgrößen auf die Faserstoffqualität gefunden. Für die Kochbedingungen wurde gezeigt, dass mit zunehmend intensiveren Aufschlussbedingungen der Umfang der Zerfaserung der Holzsubstanz zunimmt. Gleichzeitig ist aufgrund der Temperatureinwirkung von einer Veränderung der chemischen Struktur der Faser auszugehen, was Einfluss auf die Beleimbarkeit und somit die Platteneigenschaften hat. Der Einsatz verschiedener Holzarten (Kiefer, Buche, Birke, Pappel) führt zu messbaren Veränderungen der Faserstoffqualität sowie der Eigenschaften der Prüfplatten. Der Mahlscheibenabstand (MSA) wurde als eine wesentliche Einflussgröße auf die Faserstoffqualität gefunden: mit zunehmendem MSA nimmt die mittlere Faserlänge sowie der Grobanteil zu, während die Faseranzahl je mg Faserstoff abnimmt. Neben den hierzu gezielt durchgeführten Versuchen wurde dieser Einfluss auch im Rahmen anderer Versuchsreihen deutlich. Im Fall nicht aufeinander folgend durchgeführter Versuche oder wenn von thermischer Ausdehnung der Zerfaserungsaggregate auszugehen ist, überlagerte der MSA den eigentlich zu beobachtende Einflussgröße. Am Beispiel der beabsichtigten Herstellung gleicher Faserstoffe zu unterschiedlichen Zeitpunkten wurde deutlich, dass selbst unter Laborbedingungen die Wahl gleicher Zerfaserungsparameter nicht zwangsläufig zu identischen Faserstoffen führt. Zur Reproduktion gleicher Faserstoffqualitäten könnte im Umkehrschluss ein Messgerät Abhilfe schaffen.

Während der Dauer der Industrierversuche über einen Zeitraum von 100 Tagen arbeitete das Messgerät zuverlässig und ohne Defekte. Aufgrund der Ausgestaltung der Versuche lassen sich im Wesentlichen Aussagen zum Einfluss des MSA auf die Faserstoffqualität machen. Beispielsweise konnte im Rahmen einer zeitlich enggestaffelten Veränderung des Mahlscheibenabstandes mit der Absicht einer Produktumstellung anhand der Faservermessung klar die Veränderung der Faserstoffqualität nachvollzogen werden. Weiter konnte anhand der mittleren Faserlänge exemplarisch demonstriert werden, dass die vom Messgerät bestimmten Kenngrößen im Einklang mit den bekannten Kenngrößen Schüttdichte und Energiebedarf stehen. Dies spiegelt klar das Potential des Messgerätes wider und legt die Notwendigkeit weiterführender Praxiserprobungen nahe. Entgegen der anfänglich vermuteten Bedeutung der Faserstoffqualität als Indikator für die resultierenden Faserplatteneigenschaften, scheint die Bestimmung der Faserstoffzusammensetzung in der Praxis insbesondere Bedeutung für das Prozessverständnis und der Prozessoptimierung zu haben.

## 6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der durchgeführten Versuche konnte demonstriert werden, dass mit der Entwicklung des im Vorhaben verwendeten Messgeräts die bisherigen Probleme bei der Vermessung von TMP gelöst wurden. Wollig-verfilzte Faserstoffe können automatisiert vereinzelt sowie im Moment der Bildakquise überkreuzt liegende Fasern Software-basiert nachsepariert werden. Mit dem weitestgehend automatisiertem Messablauf sowie der Vermessung einer großen Anzahl an Fasern (0,8 Mio. Fasern je Messung) werden Anforderungen für den industriellen Einsatz erfüllt. Über die aus den aufgenommenen Rohdaten generierten Kennwerte lässt sich die Qualität von Faserstoffen quantifizieren. Dies konnten Labor- und Praxisversuche demonstrieren. Es steht somit der Prototyp eines Messgerätes zur Verfügung, mit dem in der MDF-Industrie folgende Arbeiten angegangen werden können:

- betriebsinterne Spezifizierung, Überprüfung und Absicherung der Faserqualität,
- betriebsdauer-unabhängige Terminierung von Wartungsintervallen (z.B. Austausch von Refinerscheiben auf Basis der veränderten Faserstoffqualität),
- objektive Beobachtung und Beurteilung der resultierenden Faserqualität bei Maßnahmen zur Prozessoptimierung sowie
- Überprüfung vereinbarter Leistungsdaten von Zerfaserungsmaschinen im Bezug auf deren Produktionsergebnis (für die Wirtschaftsbeziehung von Refinerherstellern, Pressenherstellern und Plattenproduzentern von besonderem Interesse)

Mit dem Ziel eine kommerzielle Umsetzung durch den Projektpartner GreCon zu forcieren, wurde das entwickelte Messgerät im Anschluss an das hier vorgestellte Vorhaben zur gemeinschaftlichen Erprobung und Optimierung für Versuche in die industrielle Praxis ausgeliehen. Ein Messgerät zur Bestimmung der Faserstoffqualität ist hierbei für das erprobende Unternehmen von besonderem Interesse, da hier die Faserstoffherzeugung über zwei Refinerlinien realisiert wird, von denen eine Linie Hackschnitzel und die andere Linie Späne eines benachbarten Sägewerkes verarbeitet. Für eine gezielte Prozesssteuerung und -optimierung auf Basis der erzeugten Faserstoffqualität muss entsprechend sowohl direkt nach der Zerfaserung, als auch der Faserkuchen auf dem Formband vermessen werden. Das Engagement des MDF-Herstellers begründet sich aus den ersten Erfahrungen bei der Bildanalyse-basierten Faservermessung, die mit einem auf MDF-Fasern angepassten Bildanalyse-basierten Messsystem aus der Papier und Zellstoffindustrie gesammelt wurden. Mit dem Einsatz des Messgerät-Prototypen des Thünen-Instituts wird erwartet, bisherige Grenzen der Faservereinzelnung und Fasererkennung überwinden zu können.

## Literaturverzeichnis

- BENTHIEN JT, BÄHNISCH C, HELDNER S, OHLMEYER M (2014) Effects of fiber size distribution on medium-density fiberboard properties caused by varied steaming time and temperature of defibration process. *Wood Fiber Sci* 46(2):175-185
- BENTHIEN JT, HASENER J, PIEPER O, TACKMANN O, BÄHNISCH C, HELDNER S, OHLMEYER M (2013a) Determination of MDF fiber size distribution: Requirements and innovative solution. *International Wood Composites Symposium 2013, April 03-04, 2013, Seattle*. URL: [http://literatur.vti.bund.de/digbib\\_extern/dn051921.pdf](http://literatur.vti.bund.de/digbib_extern/dn051921.pdf), Abrufdatum 01.07.2014
- Benthien JT, Heldner S, Ohlmeyer M (2013) Bildanalytische Charakterisierung trockengestreuter Faserstoffe: Ein neuer messtechnischer Ansatz für die MDF Industrie. *Arbeitskreis Faseranalytik 2013, September 11, 2013, Hannover (Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (IfBB), Hochschule Hannover)*. URL: [http://www.google.de/url?q=http://literatur.ti.bund.de/digbib\\_extern/dn052429.pdf&sa=U&ei=QnjGU8DKM42e7AbYloCABw&ved=0CBQQFjAA&usg=AFQjCNF9GzqNjNa\\_rvxtis\\_wvzO76j2TFg](http://www.google.de/url?q=http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/dn052429.pdf&sa=U&ei=QnjGU8DKM42e7AbYloCABw&ved=0CBQQFjAA&usg=AFQjCNF9GzqNjNa_rvxtis_wvzO76j2TFg), Abrufdatum: 01.07.2014
- Deppe HJ, Ernst K (1996): *MDF - Mitteldichte Faserplatten*. Leinfelden-Echterdingen, S. 107
- DEPPE HJ (2003): *Faserplatten*, in: *Holzlexikon, Band 1 A-K*. Leinfelden-Echterdingen, S. 346
- DÖRY (2012) *European panel markets and challenges for the industry*. 8th European wood-based panels symposium 10-12 October 2012 Hannover, Deutschland
- EUWID (2013) *Grecon setzt Superscan jetzt auch bei Rohplatten ein*. *EUWID Holz und Holzwerkstoffe* 7.2013 S. 27
- FAO (2012) *FAO Yearbook of Forest Products 2010*. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy (2012)
- FUNK SC (2013) *Online Analyse der Fasereigenschaften in der MDF Produktion zur Optimierung der Prozessstabilität und der Energieeffizienz*. Master thesis, University of Hamburg, 2013. URL: <http://www.holzwirtschaft.org/content.php?main=howilitdb&nav=extrakt&arbeit=alle&jahr=7>, Abrufdatum: 01.07.2014
- HASENER (2013a) *Inline Fasercharakterisierung - Traum oder Realität*. 4. Innovationsworkshop Holzwerkstoffe, 14. Mai 2013, Köln, Deutschland.
- HASENER (2013b) *Inline Fasercharakterisierung, kein Traum sondern Realität - erste Praxiserfahrungen*. 3. GreCon-Holzwerkstoffsymposium 2013, 19.-20. September 2013, Magdeburg, Deutschland.
- JENSEN U (1975): *Technisches Datenblatt für die Holzindustrie 1975/2 - Charakterisierung der Feinheit von Holzfaserstoff durch trockene Siebfraktionierung*. *Holztechnologie*, 16(3):182-184.
- MÄBERT M, KRUG D (2009): *Tangential versus radial*. *MDF-Magazin* 2009: 64-67.
- WENDERDEL UND KRUG (2012) *Untersuchungen zum Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die morphologische Ausprägung von aus Kiefernholz hergestellten TMP-Faserstoff*. *Eur J Wood Wood Prod* 70:85-89.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schemazeichnung des Fasermessgerätes .....	8
Abbildung 2: Dialogfenster der <i>Fiber View Control - V 2.0</i> Software.....	9
Abbildung 3: Dialogfenster der Grabber-Software.....	11
Abbildung 4: Muster eines Fiber-Fact-Sheets.....	17
Abbildung 5: Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe a) (Maßstab in mm).....	28
Abbildung 6: Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe b) (Maßstab in mm).....	30
Abbildung 7: Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe c) (Maßstab in mm).....	31
Abbildung 8: Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe d) (Maßstab in mm).....	32
Abbildung 9: Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe aus Gruppe e) (Maßstab in mm).....	33
Abbildung 10: Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe, an denen der Einfluss des Stoffauslasses untersucht wurde. (Maßstab in mm) .....	34
Abbildung 11: Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe, an denen der Einfluss des Mahlscheibenabstandes untersucht wurde. (Maßstab in mm).....	35
Abbildung 12: Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe, an denen der Einfluss der Holzart untersucht wurde. (Maßstab in mm).....	37
Abbildung 13: Makroskopische Ablichtung der Faserstoffe, an denen der Einfluss des Zerfaserungszeitpunktes (Reproduzierbarkeit) untersucht wurde. (Maßstab in mm).....	38
Abbildung 14: Standort des Fasermessgerätes im MDF-Werk der Glunz AG in Meppen. ....	41
Abbildung 15: Normierte Darstellung von Mahlscheibenabstand, Refinerleistung und Schüttdichte einer zeitlich enggestaffelten Entnahmereihe von Faserstoffproben .....	44
Abbildung 16: Darstellung der doppelt-längengewichteten relativen Häufigkeitsverteilung als geglättetes Häufigkeitspolygon der untersuchten Fasertypen.....	47
Abbildung 17: Massenanteile von Pappel, Laubholz (LH) ohne Pappel, Nadelholz (NH) mit Rinde und NH ohne Rinde am Holzmix für die Faserstoffe F1-F6. ....	49
Abbildung 18: Darstellung der Position der Rotorscheibe-tragenden Refinerkomponente sowie des Holzdurchsatzes gegenüber der Anzahl an Tagen nach Mahlscheiben (MS)-Wechsel. Markierung der Entnahmereihe von Faserstoffproben für detaillierte Betrachtung. Mittlere Mahlscheibenabnutzung 0,24 mm/d. ....	51

Abbildung 19: Normierte Darstellung von doppelt-längengewichteter Faserlänge, Refinerleistung und Schüttdichte einer zeitlich enggestaffelten Entnahmereihe von Faserstoffproben.....	54
---	----

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zerfaserungsbedingungen der untersuchten Faserstoffe (Laborversuche) .....	24
Tabelle 2:	Prüfkörperabmessungen und angewendete Prüfnormen .....	26
Tabelle 3:	Fasereigenschaften .....	39
Tabelle 4:	Platteneigenschaften .....	40
Tabelle 5:	Zuordnung der charakterisierten Faserstoffqualitäten zu den Faserplatten- Zielprodukten, Charakterisierung der Faserplattentypen über Plattendichte und dem der Faserstoffherstellung zugrundeliegendem Holzmix, sowie Angabe der Spanne der Plattendicke der Zielprodukte.....	45
Tabelle 6:	Auflistung der Mahlspaltbreite sowie der Box-Whisker-Plots der doppelt- längengewichteten relativen Summenhäufigkeitsverteilung für eine Abfolge (1-9) produzierter Faserstoffe. ....	52

# Thünen Report

Bereits in dieser Reihe erschienene Hefte – *Volumes already published in this series*

1 - 17	siehe <a href="http://www.ti.bund.de/de/infothek/publikationen/thuenen-report/">http://www.ti.bund.de/de/infothek/publikationen/thuenen-report/</a>
18	Patrick Küpper, Stefan Kundolf und Anne Margarian <b>Neue Beteiligungs- und Steuerungsprozesse in der ländlichen Entwicklung</b>
19	Frank Offermann, Claus Deblitz, Burkhard Golla, Horst Gömann, Hans-Dieter Haenel, Werner Kleinhanß, Peter Kreins, Oliver von Ledebur, Bernhard Osterburg, Janine Pelikan, Norbert Röder, Claus Rösemann, Petra Salamon, Jörn Sanders, Thomas de Witte <b>Thünen-Baseline 2013 – 2023: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland</b>
20	Gerald Rahmann und Uygun Aksoy (Eds.) <b>Building Organic Bridges – Volume 1: Argentina – France</b> <b>Building Organic Bridges – Volume 2: Germany – India</b> <b>Building Organic Bridges – Volume 3: Indonesia – Sri Lanka</b> <b>Building Organic Bridges – Volume 4: Sweden – Viet Nam</b>
21	Claudia Heidecke, Ulrike Hirt, Peter Kreins, Petra Kuhr, Ralf Kunkel, Judith Mahnkopf, Michael Schott, Björn Tetzlaff, Markus Venohr, Andrea Wagner und Frank Wendland Endbericht zum Forschungsprojekt „ <b>Entwicklung eines Instrumentes für ein flussgebietsweites Nährstoffmanagement in der Flussgebietseinheit Weser</b> “ <b>AGRUM<sup>+</sup>-Weser</b>
22	Walter Dirksmeyer, Ludwig Theuvsen und Maike Kayser (Hrsg.) <b>Aktuelle Forschung in der Gartenbauökonomie</b> – Tagungsband zum 1. Symposium für Ökonomie im Gartenbau
23	Karsten Mohr, Jerzy Suda, Hans Kros, Christian Brümmer, Werner L. Kutsch, Miriam Hurkuck, Elisabeth Woesner, Wim Wesseling <b>Atmosphärische Stickstoffeinträge in Hochmoore Nordwestdeutschlands und Möglichkeiten ihrer Reduzierung – eine Fallstudie aus einer landwirtschaftlich intensiv genutzten Region</b>
24	Raphael Albrecht <b>Ein Ansatz zur Abschätzung der interregionalen Wettbewerbsfähigkeit der Zuckerrübenproduktion – am Beispiel ausgewählter europäischer Regionen</b>
25	Ute Petersen, Hans-Joachim Weigel <b>Klimaresilienz durch Agrobiodiversität?</b> Literaturstudie zum Zusammenhang zwischen Elementen der Agrobiodiversität und der Empfindlichkeit von landwirtschaftlichen Produktionssystemen gegenüber dem Klimawandel
26	Mirko Liesebach (Hrsg.) <b>FastWOOD II: Züchtung schnellwachsender Baumarten für die Produktion nachwachsender Rohstoffe im Kurzumtrieb</b> – Erkenntnisse aus 6 Jahren FastWOOD
27	Claus Rösemann, Hans-Dieter Haenel, Ulrich Dämmgen, Annette Freibauer, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Beate Bauer, Bernhard Osterburg <b>Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2013</b> <b>Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2013</b>



- 28 Martin T. Bohl, Hervé Ott und Ernst-Oliver von Ledebur  
**Kurzfristige Dynamik von Preisbildungsprozessen deutscher Agrarrohstoffe** - Abschlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung für das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
- 29 Kurt-Jürgen Hülsbergen, Gerold Rahmann (Hrsg.)  
**Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben**, Forschungsergebnisse 2013-2014
- 30 Horst Gömann, Andrea Bender, Andreas Bolte, Walter Dirksmeyer, Hermann Englert, Jan-Henning Feil, Cathleen Frühauf, Marlen Hauschild, Sandra Krengel, Holger Lilienthal, Franz-Josef Löpmeier, Jürgen Müller, Oliver Mußhoff, Marco Natkhin, Frank Offermann, Petra Seidel, Matthias Schmidt, Björn Seitsch, Jörg Steidl, Kathrin Strohm, Yelto Zimmer  
**Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen**, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)
- 31 Jan L. Wenker und Sebastian Rüter  
**Ökobilanz-Daten für holzbasierte Möbel**
- 32 **Ländliche Lebensverhältnisse im Wandel 1952, 1972, 1993, 2012**  
Luisa Vogt, Ralf Biernatzki, Michael Kriszan und Wolf Lorleberg  
**Volume 1 – Dörfer als Wohnstandorte**  
Simone Helmle und Carmen Kuczera  
**Volume 2 – Typisch ist das vermeintlich Untypische: Alltag von Dorfbewohnern**  
Andreas Keil, Charlotte Röhner, Ina Jeske, Michael Godau, Stefan Padberg, Jennifer Müller, Nur Seyfi und Mira Schraven  
**Volume 3 – Kindheit im Wandel**  
Stephan Beetz unter Mitarbeit von Alexander Voigt, Anna-Clara Gasch und Sarah Rodriguez-Abello  
**Volume 4 – Soziale Unterstützungsstrukturen im Wandel**  
Michaela Evers-Wölk, Britta Oertel, Sie Liong Thio, Carolin Kahlisch und Matthias Sonk  
**Volume 5 – Neue Medien und dörflicher Wandel**
- 33 Anja-Kristina Techen, Elke Ries, Annett Steinführer  
**Evaluierung der Gewässerschutzberatung in Hessen im Kontext der EU-Wasserrahmenrichtlinie: Auswirkungen auf Wissen und Handeln von Landwirten**
- 34 Jan T. Benthien, Sabrina Heldner, Martin Ohlmeyer, Christian Bähnisch, Jörg Hasener, Clemens Seidl, Alfred Pfemeter, Christian Kathmann  
**Untersuchung der Faserqualität von TMP für die MDF-Produktion – Abschlussbericht zum FNR-Vorhaben „Fiber-Impact“ (FKZ: 22013211)**



THÜNEN

**Thünen Report 34**

Herausgeber/Redaktionsanschrift

Johann Heinrich von Thünen-Institut

Bundesallee 50

38116 Braunschweig

Germany

[www.ti.bund.de](http://www.ti.bund.de)

