Physikalisch-technologische Untersuchungen zur Faserstofferzeugung für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)
der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von
Simon Valentin Barth
geboren am 18.11.1984 in Tübingen

Göttingen, September 2021

1. Gutachter: Prof. Dr. Carsten Mai (Georg-August-Universität Göttingen)
2. Gutachter: Prof. Dr. Andreas Michanickl (Technische Hochschule Rosenheim)
3. Gutachter: Prof. Dr. Kai Zhang (Georg-August-Universität Göttingen)

Tag der mündlichen Prüfung: 12. November 2021

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	IV
Abstract	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	2
1.1 Hintergrund	2
1.2 Zielstellung	3
2 Charakterisierung von Holz als Faserrohstoff unter Berücksichtigung der Holzarten Fichte und Buche	5
2.1 Anatomischer Aufbau	5
2.1.1 Strukturmerkmale	5
2.1.2 Zusammensetzung und geometrische Variabilität des Holzgewebes . . .	6
2.2 Chemisch-struktureller Aufbau	8
2.2.1 Ultrastruktur und chemische Komponenten	8
2.2.2 Verteilung der Komponenten im Zellverbund	10
2.3 Holzimmanente Eigenschaften	11
2.3.1 Holzfeuchte	11
2.3.2 Erweichungsverhalten	12
2.3.3 Wärmeleitung	15
3 Technologie der Faserstofferzeugung	17
3.1 Holzvorbereitung	17
3.2 Chemischer Aufschluss (Zellstoffherstellung)	17
3.3 Mechanische Faserstofferzeugung	17
3.3.1 Holzschliff	17
3.3.2 RMP-Verfahren	18
3.3.3 TMP-Verfahren	20
3.3.4 CTMP-Verfahren	21
3.4 Mahlscheiben	22
3.4.1 Konstruktionsmerkmale	22
3.4.2 Zerfaserungskinetik	23
3.4.3 Simulation	24
4 Charakterisierung der Beschaffenheit von Faserstoffen	26
4.1 Zusammensetzung und ausgewählte Eigenschaften	26
4.2 Dispersitätseigenschaften und Partikelmesstechnik	27
4.3 Mikroskopische Untersuchungen	29
5 Herstellung und ausgewählte Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen	30
5.1 Rohstoffe, Zusatzstoffe, Hilfsstoffe und Klebstoffe	30

5.2	Spezielle Prozesstechnik	31
5.3	Aspekte der Wärmeleitfähigkeit	31
6	Material und Methoden	34
6.1	Material	34
6.1.1	Beschreibung des Ausgangsmaterials	34
6.1.2	Industrielle Zellstoffe, Holzstoffe und Holzfaserdämmstoffe	34
6.2	Faserstofferzeugung	35
6.2.1	Spezifikationen der Mahlscheiben	35
6.2.2	Konfiguration der Laborrefineranlage im TMP-Verfahren	39
6.2.3	Konfiguration der Laborrefineranlage im RMP-Verfahren	41
6.2.4	Erfassung von Prozessparametern	43
6.3	Vliesbildung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	43
6.4	Analytische Methoden	44
6.4.1	Grundlegende Untersuchungen zur Prozessführung in der labortechnischen Faserstofferzeugung	44
6.4.2	Bestimmung der Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattdampfatmosfera	45
6.4.3	Bestimmung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in der Faserstofferzeugung	48
6.4.4	Bestimmung der Feuchte und Konsistenz von Faserstoffen	49
6.4.5	Bestimmung der Dispersitätseigenschaften von Faserstoffen mit der Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung	49
6.4.6	Bestimmung der Dispersitätseigenschaften von Faserstoffen mit der Individualmethode quantitative Bildanalyse	51
6.4.7	Mikroskopische Untersuchungen an den Faserstoffen	54
6.4.8	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Faserstoffen	54
6.5	Datenverarbeitung und statistische Methoden	56
7	Ergebnisse und Diskussion	59
7.1	Grundlegende Untersuchungen zur Prozessführung in der labortechnischen Faserstofferzeugung	59
7.1.1	Einleitung	59
7.1.2	Ausgangs-Partikelgröße der Laborhackschnitzel und Ziel-Partikelgröße industrieller Faserstoffe	60
7.1.3	Untersuchung grundlegender Parameter der Prozessführung auf ausgewählte Zielgrößen der labortechnischen Faserstofferzeugung	64
7.1.4	Erkenntnisse und Konsequenzen für die weiteren Untersuchungen	69
7.2	Untersuchungen zur Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattdampfatmosfera	71
7.2.1	Einleitung	71
7.2.2	Absorption von Wasser in Abhängigkeit des Sattdampfdrucks	72
7.2.3	Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks	80
7.2.4	Zeitlicher Verlauf der Absorption und Desorption	81
7.3	Untersuchungen zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in der Faserstofferzeugung	83
7.3.1	Einleitung	83
7.3.2	Spezifische elektrische Leistungsaufnahme im TMP-Verfahren	83
7.3.3	Spezifische elektrische Leistungsaufnahme im RMP-Verfahren	100

7.4	Untersuchungen zum elektrischen und thermischen Energiebedarf in der Faserstofferzeugung	104
7.4.1	Einleitung	104
7.4.2	Spezifische elektrische Leistungsaufnahme als Funktion der Temperatur	105
7.4.3	Holzfeuchte und Konsistenz nach dem Aufschluss	109
7.4.4	Elektrischer und thermischer Energiebedarf in der Faserstofferzeugung mit dem RMP- und dem TMP-Verfahren	111
7.5	Untersuchungen zur Beschaffenheit der Faserstoffe	115
7.5.1	Einleitung	115
7.5.2	Dispersitätseigenschaften nach der Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung	115
7.5.3	Dispersitätseigenschaften nach der Individualmethode quantitative Bildanalyse	121
7.5.4	Effizienz in der Faserstofferzeugung	131
7.5.5	Mikroskopische Untersuchungen an den Faserstoffen	134
7.6	Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe	141
7.6.1	Einführung	141
7.6.2	Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe	141
7.6.3	Zusammenhänge zwischen Faserstofferzeugung, Dispersitätseigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit	147
8	Abschließende und zusammenfassende Diskussion mit Ausblick	150
8.1	Physikalisch-technologischer Erkenntnisgewinn zur Faserstofferzeugung für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen	150
8.2	Nutzen von Laborversuchen und Übertragung der Ergebnisse in den industriellen Maßstab	153
9	Danksagung	170
10	Anhang	171
10.1	R-Codes zur Datenverarbeitung und graphischen Darstellung	171
10.2	Korrelationen mit der Wärmeleitfähigkeit	175
10.3	Veröffentlichungen	180

Zusammenfassung

Die **Zielstellung** der Arbeit war es, die Faserstoffherzeugung für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen zu untersuchen, um zu einem besseren Verständnis der dort stattfindenden physikalischen Vorgänge beizutragen. Für die Bearbeitung der Zielstellung wurden physikalische Experimente zur Faserstoffherzeugung im Labormaßstab mit dem TMP-Verfahren (Thermo Mechanical Pulp) und dem RMP-Verfahren (Refiner Mechanical Pulp) sowie den Holzarten Fichte (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) durchgeführt.

Aus den **grundlegenden Untersuchungen zur Prozessführung** der labortechnischen Faserstoffherzeugung konnte eine Vorgehensweise abgeleitet werden, mit der reproduzierbare Ergebnisse in der Untersuchung von Mahlscheiben erzielt werden. Die Untersuchung der **Sorption von Wasserdampf durch Hackschnitzel in Sattedampfatmosfera** mit einem Sattedampfdruck zwischen 1 bar und 9 bar respektive einer Temperatur von 120 °C bis 180 °C wurde mittels einer gravimetrischen Messeinrichtung ermittelt. Mit dieser *in situ* Bestimmung der Holzfeuchte wurde eine vom Sattedampfdruck und der Ausgangs-Holzfeuchte abhängige Absorption von Wasser nachgewiesen, die mit der berechneten Wärmemenge zur Erwärmung der Hackschnitzel assoziiert ist. Die Holzfeuchte nach Entspannung des Sattedampfdrucks war unabhängig von der Höhe des Sattedampfdrucks und stellte sich oberhalb der Ausgangs-Holzfeuchte ein. Der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme und -abgabe erfolgte simultan zum Anstieg und Abfall des Sattedampfdrucks. Die Untersuchungen zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme im **TMP-Verfahren** zeigten ferner, dass signifikante Unterschiede bezüglich der Holzarten, der Aufschlusstemperaturen und der Mahlscheibenmuster bestanden. Die Faserstoffherzeugung mit der Holzart Buche zog, im Vergleich zur Holzart Fichte, eine geringere spezifische elektrische Leistungsaufnahme nach sich. Mit steigender Aufschlusstemperatur nahm die spezifische elektrische Leistungsaufnahme bei beiden untersuchten Holzarten ab und die Differenzen zwischen den Mahlscheibenmustern wurden geringer. Im **RMP-Verfahren** konnte die prinzipielle Machbarkeit der Faserstoffherzeugung für Holzfaserdämmstoffe mit einem speziell entwickelten Mahlscheibenmuster belegt werden. Aus den Versuchen zur Faserstoffherzeugung wurde die Erkenntnis gewonnen, dass neben dem Erweichungsverhalten der Holzarten, insbesondere die Gestaltung der Mahlscheibe mit der Reduzierung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme einherging. Aus den weiteren Untersuchungen zum **elektrischen und thermischen Energiebedarf in der Faserstoffherzeugung** entstand die Erkenntnis, dass neben dem Sattedampfdruck respektive der Aufschlusstemperatur die spezifische elektrische Leistungsaufnahme in Beziehung mit der Konsistenz der Faserstoffe nach dem Aufschluss steht.

Die Analyse zur **Beschaffenheit der Faserstoffe** wurde mit der Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung und der Individualmethode quantitative Bildanalyse durchgeführt. Mit beiden Methoden konnten Unterschiede in den Dispersitätseigenschaften bezüglich der Holzarten, der Aufschlusstemperaturen und der Mahlscheibenmuster nachgewiesen werden. Sowohl mit der Luftstrahl-Prüfsiebung als auch mit der quantitativen Bildanalyse wurde festgestellt, dass die Feinheit der Partikel mit steigender Aufschlusstemperatur zunimmt. Die **Wärmeleitfähigkeit** wurde im Zweiplattenverfahren an Faserstoffprobekörpern ermittelt, die mit einer aerodynamischen Vlieslegung gebildet wurden. Korrelationstabellen zur Identifizierung von **funktionalen Zusammenhängen** zwischen Dispersitätseigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit lassen den Schluss zu, dass die Feinheit der faserartigen Partikel in Beziehung mit der Wärmeleitfähigkeit stehen. Insgesamt boten spezielle Mahlscheibenmuster ein hohes Potenzial, um den elektrischen und thermischen Energiebedarf im Prozess der Faserstoffherzeugung zu senken und die Beschaffenheit der Faserstoffe für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen zu optimieren.

Abstract

The **aim** of this work was to investigate the process step of pulp production for the manufacture of wood fibre insulation materials in order to contribute to a better understanding of the physical processes taking place. For this purpose, physical experiments on a laboratory scale were carried out in the thermo mechanical pulping process (TMP) and refiner mechanical pulping process (RMP) with spruce (*Fagus sylvatica* L.) as well as with beech (*Fagus sylvatica* L.).

From the **basic investigations on the process** of the pulp production with a laboratory refiner plant, it was possible to derive a method to gain reproducible results in the testing of refiner plates. The procedure applied yielded results that are comparable to those obtained in industrial pulp production. The investigation of the **sorption of water vapor by wood chips in saturated steam atmosphere** with a pressure between 1 bar and 9 bar respectively a temperature from 120 °C to 180 °C was determined by means of a gravimetric measuring device. With this *in situ* determination the moisture content of the wood was determined as a function of the saturated steam pressure and the initial moisture content of the wood, which was then compared with the calculated amount of steam for heating the wood chips. The wood moisture content after relaxation of the saturated steam pressure was independent of its level and was above the initial wood moisture content. The time course of water uptake and release occurred simultaneously with the rise and decrease of the saturated steam pressure. The investigations on the specific electrical power consumption in the **TMP process** also showed that significant differences exist with respect to the wood species, pulping temperatures and the refiner plate patterns. Compared to spruce, the pulp production with the beech resulted in a lower specific electrical power consumption. With increasing pulping temperature, the specific electrical power consumption decreased for both species, and the differences between the refiner plate patterns became smaller. For the **RMP process** the feasibility in principle of producing pulps for wood fiber insulation materials was demonstrated with a specially developed refiner plate pattern.

From the pulp production trials, the insight was gained that, in addition to the softening behavior of the wood species, especially the design of the refiner plate correlates with the reduction of the specific electrical power consumption. From the further investigations on the electrical and thermal power consumption in pulp production, it was discovered that the moisture content of the pulp after refining is related to the pulping temperature and the **specific electrical power requirement**.

The **analysis of pulp** was carried out using the collective method of air-jet sieving and the individual method of quantitative image analysis. With both methods, significant differences in the dispersity characteristics with respect to the wood species, pulping temperatures, and refiner plate patterns were demonstrated. With both air jet test sieving and quantitative image analysis, it was found, that the fineness of the particles increases with elevated pulping temperature.

The **thermal conductivity** was determined by the two-plate method on dry pulp samples which were formed with an aerodynamic nonwoven layup. Correlation tables to identify functional relationships between dispersivity properties and thermal conductivity indicated that a high fineness of the fibrous particles is related to a low thermal conductivity. Overall, special refiner plates offered a high potential to reduce the electrical and thermal energy requirements in the pulp production process and to optimize the properties of the pulp for the production of wood fiber insulation materials.

Abkürzungsverzeichnis

Alphabetische Auflistung von Einheiten, Sonder- und Formelzeichen

$^{\circ}dH$	Grad deutscher Härte
$\rightarrow \infty$	gegen unendlich
"	Zoll
A	Fläche
A_i	Partikelfläche
A_p	durchschnittliche Partikeloberfläche
c_H	spezifische Wärmekapazität von Holz
C_i	flächenäquivalenter Durchmesser
c_W	spezifische Wärmekapazität von Wasser
d	Tag
d	Dicke
ΔT	Temperaturdifferenz
Δx_r	Partikelausdehnungsintervall
η	Effizienz
h	Stunde
Hz	Hertz
J	Joule
K	Kelvin
kJ	Kilojoule
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
λ	Wärmeleitfähigkeit
λ_{10}	Wärmeleitfähigkeit bei einer Probenmitteltemperatur von 10 °C
$\lambda_{90/90}$	90 % der Messwerte sind mit 90 %-iger Wahrscheinlichkeit kleiner oder gleich dem Nennwert der Wärmeleitfähigkeit
λ_D	Nennwert der Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{w\parallel}$	Wärmeleitung parallel zur Faser
$\lambda_{w\perp}$	Wärmeleitung senkrecht zur Faser
μm	Mikrometer
m	Meter
M'	Speichermodul
M''	Verlustmodul

m_0	Trockenmasse
$\dot{M}_{atro}$	Massenfluss absolut trocken
m_D	Dampfmenge
$m_{D,Q}$	Dampfmenge für die Erwärmung
m_H	Masse Holz
m_i	Masse Einwaage
m_s	feuchte Masse der Hackschnitzel
m_u	feuchte Masse
m_W	Masse von Wasser
mx_r	mittlere Partikelausdehnung
mg	Miligramm
min	Minute
min^{-1}	Umdrehungen pro Minute
ml	Mililiter
mm	Milimeter
n	Anzahl/Stichprobenumfang/Wiederholungen
N	Grundgesamtheit
P_{el}	elektrische Leistung
P_{NT}	elektrische „no-treatment“-Leistung
P_{ref}	elektrische Nettoleistung
P_{spez}	spezifische elektrische Leistungsaufnahme
$\dot{Q}$	Wärmestrom
Q	Wärmemenge
q_r	Verteilungsdichte
Q_r	Verteilungssumme
Q_{spez}	spezifischer thermischer Energiebedarf
ρ_w	Rohdichte der trockenen Holzsubstanz
r	Mengenart, Index einer Verteilungsfunktion: $r = 0$: Anzahl; $r = 2$: Fläche; $r = 3$: Masse
r	Verdampfungsenthalpie
R	Korrelationskoeffizient
R^2	Bestimmtheitsmaß
r_W	Verdampfungsenthalpie von Wasser
σ	Standardabweichung
$\tan \delta$	Verlustfaktor
$\tan \delta_{max}$	Maximum des α -Peaks des Verlustfaktors
t	Tonne
T_g	Erweichungstemperatur
u_d	gemessene Holzfeuchte nach Entspannung des Sattedampfdrucks
u_i	Ausgangs-Holzfeuchte

u_g	gemessene Holzfeuchte
u_r	relative Holzfeuchte
V	Volt
W	Watt
Wh	Wattstunde
$x_{16,r}$	Partikelgröße des 16 -% Perzentils der Verteilungssumme
$x_{50,r}$	Partikelgröße des Medianwerts der Verteilungssumme
x_{84}	Partikelgröße des 84 -% Perzentils der Verteilungssumme
$x_{97,r}$	Partikelgröße des 97 %-Perzentils der Verteilungssumme
x_E	geodätische Dicke
x_{Fmax}	maximaler Feret-Durchmesser
x_i	Partikel-Formdeskriptor
x_{LG}	geodätische Länge
$\bar{x}$	arithmetisches Mittel
x_r	mittlere Partikelausdehnung
γ_A	flächenbezogene Gewichtungsfunktion

Alphabetische Auflistung von Abkürzungen

atro	absolut trocken
BCTMP	bleached chemi-thermomechanical pulp
Bikofaser	Thermoplastische Zweikomponenten-Kunststofffaser
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CC	cell corner region, Zellecke
CML	Primärwand-Mittellamelle-Komplex, compound middle lamella
CMP	chemi mechanical pulp
CSF	canadian standard freeness
CTMP	chemi-thermomechanical pulp
DMA	Dynamisch-mechanische Analyse
DMTA	Dynamisch-mechanisch-thermische Analyse
dpi	dots per inch, Bildpunkte
E	Elongation
f.	auf der folgenden Seite
fa	faserartig
FB	Faserbündel
ff.	auf den nächsten Seiten
FS	Feinstoff
FSB	Fasersättigungsbereich

GS	Grobstoff
ggf.	gegebenenfalls
HC	high consistency, hohe Konsistenz
HDF	high density fibreboard, hochdichte Faserplatte
HSD	honestly significant difference, ehrliche Signifikanz
IQR	interquartile range, Interquartilabstand
K	Konsistenz
Karst.	standardisiertes Kürzel für „Hermann Karsten“
kf	kornförmig
Kf	Kurzfaser
L.	standardisiertes Kürzel für „Carl von Linné“
LC	low consistency, niedrige Konsistenz
LF	Langfaser
LOESS	locally estimated scatterplot smoothing, lokal geschätzte Streudiagrammglättung
max.	maximal
MDF	medium density fibreboard, mitteldichte Faserplatte
MDI	Diphenyl-methan-diisocyanat
MFA	micro fibril angle, Mikrofibrillenwinkel
ML	Mittellamelle
n.a.	not available, nicht verfügbar
NBSK	northern bleached softwood kraft, nördliches gebleichtes Nadelholz Kraftpapier
NIR	near-infrared, Nahinfrarot
P	Primärwand
RMP	Refiner Mechanical Pulp, mechanischer Refiner Holzstoff
s.	siehe
S1	erste Sekundärwandschicht
S2	zweite Sekundärwandschicht
S3	dritte Sekundärwandschicht
SEL	spezifische elektrische Leistungsaufnahme
T	Tertiärwand
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
TMP	Thermo Mechanical Pulp, thermomechanischer Refiner Holzstoff
u	Holzfeuchte
u.a.	unter anderem
UDP	Uridindiphosphat

vgl. vergleiche
z. B. zum Beispiel

„*My precious.*“ J.R.R. Tolkien

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Der steigenden Produktionskapazität von Holzfaserdämmstoffen in Deutschland (Mantau 2012) und Europa (Euwid 05.07.2018) steht, gemessen an der Anzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen und geförderter Drittmittelprojekte, im Vergleich zu anderen Holzwerkstoffen wie mitteldichte Faserplatte (MDF) eine vergleichsweise geringe Forschungsaktivität gegenüber. Angesichts des **Marktpotenzials**, nicht zuletzt durch die Gesetzgebung bezüglich der Energieeinsparung in Gebäuden (Deutscher Bundestag 2020), stellen Holzfaserdämmstoffe nach wie vor ein Nischenprodukt mit einem langsam wachsenden Marktanteil dar (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2020). Aus Sicht der Holzwerkstoffindustrie wird die Marktsituation von synthetischen und anorganischen Dämmstoffen dominiert. Holzfaserdämmstoffe sind für die Verwendung in der Baubranche durch die geringere Verfügbarkeit und die höheren **Herstellungskosten** gegenüber den Konkurrenzprodukten ökonomisch weniger attraktiv (Pavel & Blagoeva 2018, S. 11). Trotz deutlich höherer Rohstoffkosten der synthetischen Dämmstoffe können diese Produkte mit teilweise besseren Eigenschaften günstiger angeboten werden (Barth 2019). Zudem bestehen beispielsweise aufgrund der Schwel- bzw. Glimmneigung von Holzfaserdämmstoffen **bauordnungsrechtliche Hürden**, die einer Erweiterung der Marktanteile zusätzlich im Weg stehen (Steeger et al. 2017).

Hobballah et al. (2018) identifizierten Optimierungspotenziale für Holzfaserdämmstoffe mit mathematischen Methoden und stuften unter anderem die Senkung der Wärmeleitfähigkeit und Herstellungskosten als erforderlich für die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit ein. In der vorliegenden Dissertation wird deshalb die Faserstofferzeugung für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen untersucht, denn solch ein Zerkleinerungsprozess verursacht nach Schönert (2003, S. 300) maßgebliche Kosten in der Produktion. Die Entwicklung und Untersuchung spezieller Mahlscheibenmuster im zentralen Prozessschritt der Faserstofferzeugung bietet eine kostengünstige **Optimierungsmöglichkeit**, denn es handelt sich hierbei um Verschleißteile, die regelmäßig ausgetauscht werden. Aus der industriellen Herstellung von MDF ist außerdem bekannt, dass durch die Entwicklung von Mahlscheiben die spezifische elektrische Leistungsaufnahme gesenkt und die Produkteigenschaften verbessert werden können (Börste 2008).

Im modernen Trockenverfahren zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen wird zur Faserstofferzeugung MDF-Technologie eingesetzt (Antrag auf Nichtnennung 1998). Vor dem Hintergrund der von MDF grundsätzlich verschiedenen, maßgeblichen Produkteigenschaft Wärmeleitfähigkeit ist es fraglich, ob in der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen derzeit das wirtschaftlich und technisch optimale Verfahren zur Faserstofferzeugung eingesetzt wird. Die Eignung von Laub- und Nadelhölzern in der MDF-Herstellung und der Einfluss ihrer Morphologie auf die physikalischen Produkteigenschaften sind grundlegend untersucht und deren Verwendung seit längerem Stand der Technik (Roffael et al. 1994a,b, 1995). Über den Einfluss von Mahlscheiben und von Aufschlussbedingungen in der Faserstofferzeugung für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen im **TMP-Verfahren** (Thermo Mechanical Pulp) mit Buchen- und Fichtenholz lagen zu Beginn der Bearbeitung entweder keine Ergebnisse von systematischen Untersuchungen zur spezifischen

elektrischen Leistungsaufnahme vor oder es bestanden Wissenslücken bezüglich der Wärmeleitfähigkeit. Das **RMP-Verfahren** (Refiner Mechanical Pulp) wurde seit den 1960er Jahren in der Papierherstellung eingesetzt und im Zusammenhang mit der Holzfaserdämmstoffherstellung bislang nicht auf die Machbarkeit und Energieeinsparpotenziale hin untersucht. Inwiefern Unterschiede in der Beschaffenheit der Faserstoffe (Faserlänge, Faserfeinheit, Anteile der Partikelklassen, anatomische Unterschiede der Holzarten) in Beziehung zur **Wärmeleitfähigkeit** stehen, ist nicht gesichert.

1.2 Zielstellung

Die Zielstellung der Arbeit umfasst grundlegende physikalische und technologische Fragestellungen zum Einfluss unterschiedlicher Mahlscheibenmuster sowie Aufschlussstemperaturen auf den thermischen und elektrischen Energiebedarf in der Faserstoffherzeugung. Das übergeordnete **Ziel** ist es, den Prozessschritt der Faserstoffherzeugung für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen zu untersuchen, um zu einem besseren Verständnis der dort stattfindenden physikalischen Vorgänge beizutragen. Für die Bearbeitung der Zielstellung werden physikalische Experimente zur Faserstoffherzeugung im Labormaßstab mit dem TMP-Verfahren (Thermo Mechanical Pulp) und dem RMP-Verfahren (Refiner Mechanical Pulp) sowie den Holzarten Fichte (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) durchgeführt. Zu Beginn der Arbeit wird der Stand der Wissenschaft und Technik zu Holz als Faserrohstoff, zur Faserstoffherzeugung im TMP- und RMP-Verfahren, der Charakterisierung von Faserstoffen sowie zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen zusammengefasst. Aus den hierbei gewonnenen Erkenntnissen wird der Forschungs- und Entwicklungsbedarf des Themas herausgearbeitet. Im speziellen Teil der Arbeit werden dazu experimentelle physikalische und technologische Untersuchungen durchgeführt sowie unterschiedliche Methoden zur Analyse der Beschaffenheit und der Eigenschaften von Faserstoffen angewendet. Die eigenen Untersuchungen sind zu diesem Zweck in sechs Teilaspekte untergliedert.

Teilaspekt 1 widmet sich grundlegenden Untersuchungen zur Prozessführung in der labortechnischen Faserstoffherzeugung mit der zentralen Forschungsfrage: Welche Auswirkungen hat die Prozessführung auf ausgewählte Zielgrößen der labortechnischen Faserstoffherzeugung?

In **Teilaspekt 2** werden Untersuchungen zur Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Satteldampf Atmosphäre durchgeführt. Hierbei wird eine Antwort auf die Frage gesucht, wie sich die Holzfeuchte in Satteldampf Atmosphäre unter erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur verhält.

Der **Teilaspekt 3** enthält Untersuchungen zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in der Faserstoffherzeugung. In diesem Zusammenhang wird der Fragestellung nachgegangen, welchen Einfluss unterschiedliche Mahlscheibenmuster auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme im TMP- und RMP-Verfahren haben.

Die Untersuchungen zum elektrischen und thermischen Energiebedarf in der Faserstoffherzeugung in **Teilaspekt 4** behandeln die Fragestellung, welche Beziehungen zwischen der Holzfeuchte der Hackschnitzel in der Faserstoffherzeugung und der Konsistenz der Faserstoffe nach der Faserstoffherzeugung sowie dem elektrischen und thermischen Energiebedarf bestehen.

Teilaspekt 5 dient Untersuchungen zur Beschaffenheit der Faserstoffe. Hier lautet die Forschungsfrage, welche Auswirkung die Faserstoffherzeugung im TMP- und RMP-Verfahren mit unterschiedlichen Mahlscheibenmustern auf die Beschaffenheit der Faserstoffe hat. Weiterhin stellt sich die Frage, ob funktionale Zusammenhänge zwischen den Dispersitätseigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe bestehen.

Der abschließende **Teilaspekt 6** beinhaltet Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit der Fa-

serstoffe. Bezüglich der maßgeblichen Produkteigenschaft von Holzfaserdämmstoffen ist die zentrale Forschungsfrage in diesem Fall, welche Wärmeleitfähigkeit Faserstoffvarianten besitzen, die mit unterschiedlichen Mahlscheibenmustern, Aufschlusstemperaturen und Aufschlussverfahren erzeugt wurden. Den Teilaspekten ist jeweils eine Einleitung vorangestellt, in der die wissenschaftlichen Arbeitsziele formuliert sind.

2 Charakterisierung von Holz als Faserrohstoff unter Berücksichtigung der Holzarten Fichte und Buche

2.1 Anatomischer Aufbau

2.1.1 Strukturmerkmale

Aus verfahrenstechnischer Sicht bietet der anatomische Aufbau von Holz und dessen Struktur, die als **Aggregat** aus Holzzellen beschrieben werden kann (Bohnet 2004, S. 14), eine einzigartige Zweckeignung zur produkt- und prozessspezifischen Faserstoffherzeugung (Kürschner 1966, S. 34). Im Holz von Bäumen spiegelt sich der für biologische Materialien typische, hierarchisch strukturierte Aufbau in der makroskopischen, mikroskopischen und submikroskopischen Betrachtungsebene wider (Stamm 1964a, S. 3). Synonym zu Holz wird auch von Lignozellulosen gesprochen, um das filigrane Gefüge des Mikro- und Nanoverbunds aus Polysacchariden und Ligninen zu betonen (Faix 2008, S. 47).

Makroskopisch betrachtet ist Holz ein von Gymnospermen (z. B. *Pinaceae*) und Angiospermen (z. B. *Fagaceae*) gebildeter poröser, heterogener Zellverbund (Fromm 2013, 33 ff.). In den gemäßigten Klimazonen bildet die periodische Aktivität des Kambiums während des sekundären Dickenwachstums konzentrische Jahresringe aus Früh- und Spätholz aus. Im Stammquerschnitt sind weiterhin Splint und Trockenkern bei der Holzart Fichte (*Picea abies* Karst.), respektive Splint und Kernholz bei der Holzart Buche (*Fagus sylvatica* L.) funktionell unterscheidbar (Kollmann 1951a, S. 6).

Mit der Einteilung des Holzgewebes in physiologische und mechanische Aufgaben beginnt die **mikroskopische Betrachtungsebene**. Allen Holzarten gemein ist die Zelldifferenzierung ausgehend von zwei meristematischen Zelltypen: Den fusiformen Initialen, aus denen die axial angeordneten Zellen hervorgehen, und den Strahlinitialen, die radial angeordnete Zellsysteme ausbilden (Fromm 2013, S. 5). Die geometrische Beschaffenheit der unterschiedlichen Zellarten variiert arttypisch innerhalb des Stammes sowie standortabhängig in Länge, Querschnitt, Durchmesser, Lumen- und Zellwandanteil (Stamm 1964a, S. 4).

Vor dem Hintergrund der Faserstoffherzeugung sind in der **submikroskopischen Betrachtungsebene** der Aufbau des Zellverbunds und die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Komponenten von Interesse. Die drei polymeren Hauptkomponenten Zellulose, Hemizellulosen und Lignine bilden hierbei einen porösen Mikro- und Nanoverbund, in dem teilkristalline Zellulosefibrillen in einer Matrix aus amorphen Hemizellulosen und Ligninen organisiert sind (Salmén 2004; Geoffrey 2009, S. 60). Wasser ist ein weiterer Bestandteil der Holzmatrix und hat im hygroskopischen Bereich Einfluss auf die viskoelastischen Eigenschaften des Holzes (Faix 2008, S. 48; Chen et al. 2018).

2.1.2 Zusammensetzung und geometrische Variabilität des Holzgewebes

Die Faserstoffherzeugung und die daraus resultierenden, übergeordneten Produkteigenschaften von holzfaserbasierten Werkstoffen sind von der natürlichen Zusammensetzung und geometrischen Variabilität des Holzgewebes abhängig. Dies betrifft insbesondere die Zusammensetzung der Zellarten, die Länge der Zellen sowie deren Dicke bzw. Feinheit. Die Ausbildung der Merkmale ist arttypisch und wird von anatomischen Ausprägungen des Baumes (Jung-, Kern-, Früh-, Spät-, Reaktionsholz, etc.) und der forstwirtschaftlichen Holzproduktion (Forstpflanzenzucht, Waldumtriebszeiten, etc.) beeinflusst (Kucera 1994; Lindstrom 1997). In Abbildung 2.1 sind **typische Zellen** von Nadel- und Laubhölzern abgebildet, um deren grundlegende Unterschiede zu verdeutlichen. Die Variabilität des Holzgewebes hängt darüber hinaus von der Population (Standort) ab und schwankt zwischen einzelnen Bäumen auch aufgrund der genetischen Varianz (Zobel & Buijtenen 2012). Grundsätzlich liegt die geometrische Variabilität der Zellarten in Laub- und Nadelhölzern weitgehend normalverteilt vor (Kollmann 1965; Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955, S. 145). Tabelle 2.1 gibt einen quantitativen Überblick über die Variabilität der geometrischen Eigenschaften, die in den Untersuchungen zur Beschaffenheit der Faserstoffe zur Anwendung kommen.

Abbildung 2.1: Darstellung von unterschiedlichen Zellarten des Holzgewebes. **a**, Typische Nadelholzzellen: a) Frühholztracheide der Fichte; b, c) Früh- und Spätholztracheiden der Kiefer; d) Vasizentrische Tracheide; e, f) Gefäßtracheiden; g, h) Strahltracheiden der Kiefer (g) und Fichte (h); i, j) Strahlparenchym der Kiefer (i) und Fichte (j). (Geoffrey 2009, S. 49). **b**, Typische Laubholzzellen: a) Obere Reihe von links nach rechts: Frühholzgefäß Esche, Frühholzgefäß Birke; Gefäß Birke, Librifaser Birke, Tracheide Birke, Tracheide Eiche. Untere Reihe von links nach rechts: Früh- und Spätholzgefäße Eiche, Längsparenchym Eiche, Strahlparenchym Birke. (Geoffrey 2009, S. 54).

Tabelle 2.1: Variabilität der geometrischen Eigenschaften vorrangiger Zelltypen von Fichte (*Picea abies*) und Buche (*Fagus sylvatica*). Quelle: Eigene Darstellung nach den in der Tabelle genannten Quellen.

Eigenschaft	Einheit	<i>Picea abies</i>	Spezies/Zellarten	Quelle
			<i>Fagus sylvatica</i>	
Darrdichte	kg/m ³	420...430	680	Bleichschmidt (2013)
Porenvolumen	%	80	63	Bleichschmidt (2013)
Fasersättigungsfeuchte	%	34,8	28,9	Bleichschmidt (2013)
			Fasertracheiden & Librifasern	
Länge	mm	1,7...2,9...3,7	0,5...1,2...1,7	Fengel & Wegener (2003), Geoffrey (2009)
Dicke	µm	20...30...40	14...21...30	Fengel & Wegener (2003), Geoffrey (2009)
Elongation		0,009...0,010...0,011	0,028...0,018...0,018	Eigene Berechnung
Zellwanddicke	µm	2,1...4,3	5	Fengel & Wegener (2003)
			Tracheen	
Länge	mm		0,3...0,7	Fengel & Wegener (2003)
Durchmesser	µm		20...150	Fengel & Wegener (2003)
Elongation			0,67...0,47	Eigene Berechnung
Zellwanddicke	µm		1	Fengel & Wegener (2003)
			Anteile der Zellarten	
Tracheiden	%	94,5...96,5		R. Wagenführ (2007), Huber & Prütz (1938)
Fasertracheiden & Librifasern	%		37,4...42,7	R. Wagenführ (2007), Schulz (1957)
Tracheen	%		30,0...31,0	R. Wagenführ (2007), Schulz (1957)
Längsparenchym	%	1,4...5,8	4,6...4,8	R. Wagenführ (2007), Schulz (1957)
Strahlparenchym	%	4,7	17...27	R. Wagenführ (2007), Schulz (1957)
Die unterstrichenen Werte stellen das arithmetische Mittel innerhalb der Spannweite dar.				

2.2 Chemisch-struktureller Aufbau

2.2.1 Ultrastruktur und chemische Komponenten

Die Organisation der Ultrastruktur, speziell die Konstitution und das Zusammenwirken der Holzpolymere in der Zellwand und Mittellamelle, sind Gegenstand der Forschung. Das wird insbesondere bei Versuchen deutlich, Holzeigenschaften auf Grundlage der bislang bekannten Eigenschaften und Zusammensetzungen der Einzelkomponenten zu modellieren (Salmén 2015). Ein generell akzeptiertes Modell für die Ultrastruktur der extra- und intrazellulären Matrix ist das in Abbildung 2.2a beispielhaft dargestellte **Schichtmodell**. Die konzentrisch angeordneten Zellwandschichten divergieren im Mikrofibrillenwinkel (micro fibril angle, MFA), dem Anteil der Holzpolymere und den Inhaltsstoffen (u.a. Fengel & Wegener 2003, S. 14). In Bezug auf die Faserstoffherzeugung wird das Schichtmodell auch für die Zerlegung des Zellverbunds in Abhängigkeit des Verfahrens herangezogen (Abbildung 2.2b). Die interzelluläre **Mittellamelle** (ML)

Abbildung 2.2: Darstellung zur Ultrastruktur des Holzes. **a**, Hypothetisches Modell der Zellwandstruktur mit Orientierung der Mikrofibrillen von Nadelholztracheiden. Blick vom Lumen auf die Zellwand nach Abe & Funada (2005). **b**, Zerlegung des Zellverbunds in Abhängigkeit des Verfahrens zur Faserstoffherzeugung bzw. der Aufschlusstemperatur nach Franzén (1986). ML: Mittellamelle, P: Primärwand, S₁: Erste Sekundärwandschicht, S₂: Zweite Sekundärwandschicht, S₃: Dritte Sekundärwandschicht. RMP: Refiner mechanical pulp (ca. 95 °C), TMP: Thermomechanical pulp (ca. 135 °C), MDF: Medium density fibreboard (ca. 175 °C).

sorgt im Komplex mit der Primärwand (P) als „compound middle lamella“ (CML) für die kohäsive Verbindung zwischen benachbarten Zellen (Melelli et al. 2020; R. Wagenführ & A. Wagenführ 2008, S. 37). Als gesichert gilt, dass die Mittellamelle den höchsten Gehalt an Ligninen aufweist (Stamm 1964a, S. 22; Fengel & Wegener 2003, S. 14). Weiterhin scheinen die Lignine in der Mittellamelle nicht orientiert zu sein und isotrop vorzuliegen (Salmén et al. 2012). Die Mittellamelle zwischen zwei benachbarten Zellen ist rund 0,5 µm breit (Jayme & Fengel 1961; Fromm et al. 2003). In der **Primärwand** nimmt die Anisotropie der Zellwand durch zerstreut orientierte, jedoch quer zur Zellachse ausgerichtete Zellulosefibrillen zu (Fengel & Wegener 2003, S. 14). Die Primärwand nimmt mit einer Dicke von weniger als 0,1 µm einen geringen Anteil an der Zellwand ein (Fengel & Wegener 2003, S. 17).

Als weitere Schicht schließt sich die **Sekundärwand** an die Primärwand an. Die erste Sekundärwandschicht (S_1) ist mit einem Anteil am Querschnitt von 8-16 % wesentlich dünner, als die dominierende zweite Sekundärwandschicht (S_2), die mit einer mittleren Dicke zwischen 1 μm bis über 4 μm auch den größten Anteil an der Zellwand ausmacht (Fengel & Stoll 1973). Im Gegensatz zur isotropen Mittellamelle sind die Lignine in der Sekundärwand mit den interfibrillären Meso- und Mikroporen assoziiert und entlang des MFA orientiert (Kojiro et al. 2010; Salmén 2015). Der MFA steht weiterhin in Verbindung mit den mechanischen Eigenschaften des Holzes, wobei die Struktur der S_1 auf Druckfestigkeit und die der S_2 auf Zugfestigkeit ausgelegt ist (Rowell et al. 2013, S. 48). An der Innenseite der Sekundärwand von Tracheiden, Fasertracheiden und Libriformfasern liegt die von der Zellulosefibrillenordnung ähnlich zur Primärwand aufgebaute **Tertiärwand** (T). Die ebenfalls oft erwähnte dritte Sekundärwandschicht (S_3) kommt in Parenchymzellen einiger Nadelhölzern sowie in den Libriformfasern und Tracheen der Buche vor (Fengel & Wegener 2003, S. 14). Als weiteren Bestandteil der Mikrostruktur der Zellwand müssen noch die **Tüpfel und Interzellulargänge** erwähnt werden, die dem Stoffaustausch im Zellverbund dienen (R. Wagenführ & A. Wagenführ 2008, S. 36).

Zellulose

Die in der Photosynthese gebildete Zellulosevorstufe (UDP-D-Glucose) wird in den Terminalkomplexen der Plasmamembran, unter Abspaltung eines Wassermoleküls (Anhydro- β -D-Glucose), über die dimere Grundeinheit Anhydro-Cellobiose zu polymeren Glucanketten verknüpft (β -1,4-glycosidische Bindung) (Faix 2008, S. 50). Durch die kontrollierte Bewegung der Terminalkomplexe entsteht der geschichtete Aufbau der Zellwand und der MFA (Henriksson & Lennholm 2009, 94 ff.). Die lineare, ebene Ausrichtung der Glucanketten und Bündelung zu Elementar- und Mikrofibrillen beruht auf der Sesselkonformation sowie den intra- respektive intermolekularen Wasserstoffbrücken (Faix 2008, S. 50). Die kristallinen und amorphen Aggregate der Zellulose bilden interfibrilläre Hohlräume aus, die für Wasser zugänglich sind (Salmén 2004).

Hemizellulosen

Die Hemizellulosen unterscheiden sich in der Variabilität der Monosaccharide und der Seitenketten (Stevanovic 2016, S. 69). Die Vielfalt an Pentosen, Hexosen, Uronsäuren und Deoxy-Hexosen lässt homo- und heteropolymere Kettenkonfigurationen mit unterschiedlich konfigurierten Seitenketten zu, die vereinfacht nach der Hauptkette, in Xylane und Glucomannane eingeteilt werden. Laubhölzer weisen einen höheren Anteil an Xylanen auf als Nadelhölzer und unterscheiden sich auch in der Konstitution der Glucomannane sowie der Seitenketten (Fengel & Wegener 2003, S. 106). Die Hemizellulosen binden über Wasserstoffbrücken an die Oberfläche der Mikrofibrillen aus Zellulose (Faix 2008, S. 57). Zwischen Hemizellulosen und Ligninen sorgen kovalente Bindungen und Nebenvalenzen sowie eine räumliche Verschränkung für eine belastbare Struktur (Faix 2008, S. 62). Im Vergleich zur Zellulose sind die Hemizellulosen deutlich hydrophiler. Die chemische und thermische Stabilität ist niedriger als die der Zellulose (Teleman 2009, S. 102).

Lignine

Die Lignine sind amorphe, phenolische Makromoleküle mit einer komplexen Struktur. Als gesichert gilt, dass die Lignine die Zellwand hydrophobieren, für Druck- und Biegefestigkeit sowie für die Kohäsion im Zellverbund sorgen. Während der Lignifizierung der Zellwand entstehen, aus den Vorstufen 4-Hydroxy-Zimtalkohol, Coniferylalkohol und Sinapinalkohol, die nach Anzahl der Methoxygruppen am Phenylring klassifizierten Monomere: Para-Hydroxy-Phenylpropan (H-Lignin), Guaiacylpropan (G-Lignin) und Syringylpropan (S-Lignin). Nadelhölzer sind hauptsächlich

G-lignifiziert, Laubhölzer vorwiegend GS-lignifiziert (Faix 2008, S. 60; Henriksson 2009, 121 ff.). Zusätzlich zur Kettenpolymerisation durch Knüpfung von β -O-4-Bindungen, bestehen innerhalb und zwischen den Makromolekülen weitere kovalente Vernetzungen durch mehrere, eher zufällig verteilte Ether- und Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen (Faix 2008, S. 61; Henriksson 2009, 126 ff.).

Pektine

Es ist bekannt, dass die Primärwand und Mittellamelle sowie die Grenzfläche zwischen Primärwand und Mittellamelle Pektine in teilweise erheblichen Anteilen enthalten (z.B. Zamil & Geitmann 2017; Stevanovic 2016, S. 78). Allerdings ist nicht geklärt, ob die Pektine, durch niedrige Erweichungstemperaturen und der höchsten Fähigkeit unter den Polysacchariden Wasser zu binden, in der Faserstofferzeugung eine Rolle spielen (Teleman 2009, S. 103; Salmén & Petterson 1995).

2.2.2 Verteilung der Komponenten im Zellverbund

Die Verteilung der Komponenten im Zellverbund ist für die Faserstofferzeugung relevant. In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, dass die Verhältnisse der Komponenten über den Querschnitt der Zellwand variieren. Es wird davon ausgegangen, dass die Zerteilung des Zellverbunds an oder innerhalb der von den chemischen Komponenten und Zellwandschichten gebildeten Phasen erfolgt (Abbildung 2.2) (Blehschmidt 2013, S. 58; Bohnet 2004, S. 14). Generell verschieben sich die Verhältnisse von einem hohen Anteil an Lignin in der CML zu einem hohen Anteil an **Holozellulosen** in der Sekundärwand. Die Ordnung und Packungsdichte der Cellulosefibrillen nimmt von der Mittellamelle zum Lumen hin zu und lässt in den interfibrillären Hohlräumen die sukzessive Einlagerung von Hemizellulosen und Lignin zu (Kürschner 1966, S. 43). Allgemein enthalten Nadelhölzer mehr **Lignin** als Laubhölzer, letztere weisen dagegen einen höheren Anteil an Hemizellulosen auf (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Anteile der chemischen Komponenten in den Holzarten Fichte und Buche (Blehschmidt 2013, S. 58).

Holzart	Zellulose %	Hemizellulosen %	Hexosane %	Pentosane %	Harze, Fette %	Asche %
Fichte	42...47	19...24	13	9...11	2	0,23...0,77
Buche	39...53	22...25	4	18...25	2	0,4...1,2

Aufgrund der geringen Dicke der Zellwand beziehungsweise der einzelnen Schichten ist eine direkte chemische Analyse und **Quantifizierung** der Komponenten schwierig. Die nachfolgend erwähnten indirekten analytischen Methoden bieten zumindest Anhaltspunkte zur quantitativen Verteilung der Komponenten (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Verteilung von chemischen Komponenten im Zellverbund von Tracheiden in Fichtenholz. Berechnete Werte nach Fengel & Wegener (2003, S. 228) gemittelt und gerundet.

Zellwandschicht	Zellulose %	Hemizellulose %	Lignin %
CML	14	27	59
S1	36	36	29
S2 + T	58	14	27

Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) (Abbildung 2.3) und topochemische UV-Mikrospektroskopie können den Einblick in die Struktur und die Lignifizierung der Zellwand ergänzen. Weitere spektroskopische Methoden wie Raman- oder Infrarot-Mikroskopie eignen sich zur Analyse der Zellwandstruktur und -zusammensetzung auf der molekularen Ebene (Hänninen et al. 2011). Diese Methoden sind semiquantitativ oder nicht quantitativ. Untersuchungen an Buchenholz konnten in der Literaturrecherche nicht ermittelt werden.

Abbildung 2.3: TEM Mikrofotographie von vier benachbarten Tracheiden der Holzart Tanne (*Abies alba*). Die Färbung mit Kaliumpermanganat veranschaulicht die Ligninkonzentration der Zellwand, ausgehend von einem hohen Ligninanteil in den Zellecken (cell corner region, CC) und der CML hin zu den Sekundärwandschichten S₁, S₂ und S₃. Auf der S₃ weisen die Pfeile auf die Warzenschicht hin. (Koch & Schmitt 2013).

2.3 Holzimmanente Eigenschaften

2.3.1 Holzfeuchte

Eine der grundlegenden Eigenschaften des kapillar-porösen Faserrohstoffs Holz ist die Sorption gasförmigen und flüssigen Wassers (Stamm 1964b, 142 ff.). Wasser ist ein wesentlicher Bestandteil des Holzes und insbesondere das hygroskopische Verhalten beeinflusst die **physikalischen Materialeigenschaften** (Fengel & Wegener 2003, S. 220; Faix 2008, S. 48). Das Holzgewebe bildet sich in einer mit Wasser gesättigten Umgebung und auch nach Einstellung der anfänglichen physiologischen Funktionen bleibt dieser Zustand in den Zellwänden bestehen (Skaar 1988, S. 20; Fromm 2013, S. 21). Ausgehend vom Splintholz variiert die Holzfeuchte über den Stammquerschnitt nach bekannten Mustern (Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955, S. 277).

Von prozesstechnischer Bedeutung in der Faserstofferzeugung sind zwei Grenzzustände des Systems Holz-Wasser: Namentlich der hygroskopische Bereich bis zur Fasersättigung (FSB) sowie die maximale Wassersättigung (Niemz & Sonderegger 2017, S. 85). Innerhalb des hygroskopischen Bereichs stellt sich zeitversetzt die Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Wasserdampfpartialdruck (relative Luftfeuchte) ein. Die maximal mögliche **Fasersättigung** (Tabelle 2.4) wird nach Hoffmeyer et al. (2011) bei konstanter relativer Luftfeuchte von 99,9 % unter atmosphärischen Druck erreicht. Bis zu einer Temperatur von 100 °C folgen die Sorptionsisothermen dann einem holzartenspezifisch ausgeprägten sigmoidalen Verlauf (Engelund et al. 2013). Hierzu ist anzumerken, dass verschiedene Methoden zur Bestimmung der maximalen Fasersättigung bestehen, die unterschiedliche Werte ergeben.

Verantwortlich für die hygroskopische Ad- und Desorption von Wassermolekülen sind intermole-

Tabelle 2.4: Grenzzustände des Systems Holz-Wasser in Form der mittleren Holzfeuchte der Holzarten Fichte (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) nach ¹Krpan (1954) und ²Forest Products Laboratory (2010, S. 4–3).

Holzart	Fasersättigung %	Wassersättigung %
Fichte	¹ 39	² 152 *
Buche	¹ 32	² 82 **

* Annahme: Rohdichte 460 kg/m³, ** Annahme: Rohdichte 680 kg/m³

kulare Mechanismen im Mikrosystem der Zellwand. Dort sind beispielsweise amorphe, quellbare Bereiche der Zellulose aufgrund des niedrigen chemischen Potenzials für Wasser leicht zugänglich (Chen et al. 2018). Aus der Bindung des Wassers an zugänglichen Hydroxylgruppen folgt das bekannte Quell- und Schwindverhalten des Holzes. An diesem Mechanismus ist auch die Adsorption an Hemizellulose und an deren Grenzflächen zur kristallinen Zellulose beteiligt (Kulasinski et al. 2015). Darüber hinaus hat das gebundene Wasser einen **plastifizierenden Effekt** auf die Komponenten der Zellwand, insbesondere auf die Hemizellulosen (Kelley et al. 1987). Die Beobachtung, dass bei identischer relativer Luftfeuchte die ebenfalls sigmoidale Desorptionsisotherme stets höher liegt als die Adsorptionsisotherme, wird als Hystereseeffekt bezeichnet (Stamm 1964b, 145 ff.). Die Klärung des Phänomens ist Gegenstand abgeschlossener und aktueller Forschungsarbeiten (Salmén & P. A. Larsson 2018; Fredriksson & Thybring 2018; Chen et al. 2020). Es wurden bereits zahlreiche thermodynamische und kinetische Lösungsansätze sowie Transportmodelle untersucht (Merakeb et al. 2009; Hill et al. 2012; Patera et al. 2016).

Oberhalb der Fasersättigung wird flüssiges Wasser im kapillaren Makrosystem der Lumen bis zur **Wassersättigung** (Tabelle 2.4) aufgenommen. Der maximal mögliche Wassergehalt hängt vom Porenanteil und damit von der Dichte des Holzes ab (Kollmann 1951b, S. 392). Dieses freie Wasser beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Holzes nicht weiter (Niemz & Sonderegger 2017, S. 132).

2.3.2 Erweichungsverhalten

Das rheologische Verhalten von Holz kann als **viskoelastisch** charakterisiert werden (Becker et al. 1977; Salmén 1981). Das bedeutet, dass neben den physikalischen Einflussgrößen Dichte, Temperatur und Feuchtegehalt hauptsächlich die Dauer der Beanspruchung das Deformationsverhalten beeinflusst (Salmén et al. 1999, S. 35; Baur et al. 2013, S. 37). Für die Faserstofferzeugung ist die Kenntnis des Erweichungsverhaltens von Holz wichtig, um eine energiesparende Prozessführung und qualitativ hochwertige holzfaserbasierte Werkstoffe herzustellen (Hillis & Rosza 1978).

Aus polymerwissenschaftlicher Sicht stellt die Ultrastruktur des Holzes ein viskoelastisches System im Sinne eines Mehrphasensystems dar, denn der schichtweise Aufbau des Zellverbunds ist geometrisch abgrenzbar. Die Phasen bilden wiederum einen sich stofflich unterscheidenden **Werkstoffverbund** mit einer Polymermatrix aus Lignin, in dem verstärkende Zellulosefibrillen sowie eigenschaftsverändernde Zusatzstoffe wie Hemizellulosen isotrop und anisotrop verteilt sind. Die Ligninphase wird aufgrund der kovalent vernetzten Polymerstruktur als maßgebendes Durchdringungsnetzwerk verstanden (Fengel & Wegener 2003, 167 ff.). Auf den intra- und intermolekularen Interaktionen des Netzwerks der Holzpolymere beruhen die multifaktoriellen Zusammenhänge des Erweichungsverhaltens (Smith et al. 2003a, S. 37–65, 2003b, S. 25–33; Baur et al. 2013, 51 ff.).

Im Falle statischer bzw. **quasi-statischer Belastungen** mit Verformungsgeschwindigkeiten nahe Null besitzt Holz bei kurzzeitigen Belastungen unterhalb der Proportionalitätsgrenze vollständig elastische Festigkeitseigenschaften. Beim Überschreiten der Proportionalitätsgrenze treten irreversible plastische Verformungen in allen Betrachtungsebenen der Holzstruktur auf. Beim Erreichen der Trennfestigkeit führen inter- und intrazelluläre Brüche zum instantanen Versagen der Holzmatrix (Winandy & Rowell 2013, S. 414–417). Der Ort des Bruches hängt in der Faserstoffherzeugung von den Aufschlussbedingungen ab (Abbildung 2.2).

In der mechanischen Faserstoffherzeugung bewirken Schubspannungen infolge von Scherung sowie Druckspannungen die Trennung des Zellverbunds, vorrangig in transversaler Richtung (radial, tangential) (Havimo 2009). Solche **dynamischen Belastungen** mit Verformungsgeschwindigkeiten deutlich größer Null führen zu einem Versagen der Holzmatrix unterhalb der Proportionalitätsgrenze (Aicher & Christian o. D.). Die einhergehende mechanische Dämpfung durch Deformation des Zellverbunds gilt als Maß für die innere Reibung und wird in Wärme umgewandelt (Bodig & Jayne 1993, S. 230; Htun et al. 1993, S. 1089).

Im Falle **kurzzeitiger Temperatureinwirkungen** auf Polymere werden die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften als Funktion der Temperatur und/oder Beanspruchungsfrequenz charakterisiert (Baur et al. 2013, S. 111). Die Methode der dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA) basiert auf harmonischer Belastung einer Probe (Kraft oder Weg) und Messung der Reaktion (Kraft oder Weg) und ist geeignet, den Einfluss der Temperatur getrennt vom zeitlichen Einfluss zu messen (Placet et al. 2007). Dabei beschreibt der Verlustfaktor $\tan \delta$ (Gleichung 2.1) die dynamische Viskoelastizität als dimensionslosen Phasenwinkel (Versatz) zwischen einer Spannung in Form des Speichermodul M' und einer Verformung in Form des Verlustmodul M'' .

$$\tan \delta = \frac{M''}{M'} \quad (2.1)$$

Für einen ideal elastischen Körper nimmt $\tan \delta$ den Wert 0 ($M'' = 0$; $\tan \delta \rightarrow 0$) an und geht für einen ideal viskosen Körper gegen unendlich ($M' \rightarrow 0$; $\tan \delta \rightarrow \infty$) (DIN EN 6721-1:2019 2019). Das Merkmal für den feuchteabhängigen Erweichungsbereich von Holz ist der α -Peak von $\tan \delta$, der als Erweichungstemperatur T_g in Anlehnung an die Glasübergangstemperatur von Polymeren definiert ist (Kelley et al. 1987; Placet et al. 2007; Havimo 2009). Bei steigender Beanspruchungsfrequenz weist der Erweichungsbereich Eigenschaften eines **dynamischen Glasübergangs** auf (Becker et al. 1977; Irvine 1985; Baur et al. 2013, S. 36).

Dieser α -Peak kann mit der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in der mechanischen Faserstoffherzeugung in Verbindung gebracht werden, da die **hygrothermische Erwärmung** mit Sattedampf Einfluss auf die viskoelastischen Festigkeitseigenschaften und das Erweichungsverhalten hat (Blechsmidt et al. 1986). Bei der Erwärmung von Hackschnitzeln mit Sattedampf liegt die Holzfeuchte oberhalb des Fasersättigungsbereichs bis hin zu maximaler Wassersättigung durch Absorption von Kondensat (vgl. Abschnitt 7.2). Die Hemizellulosen erweichen unter wassergesättigten Bedingungen bereits bei 20 °C und insofern ist die Ligninerweichung in der mechanischen Zerfaserung maßgebend (Back & Salmén 1982). Die maximalen Werte der α -Peaks für den Verlustfaktor $\tan \delta_{max}$ variieren unter wassergesättigten Bedingungen und die entsprechende Erweichungstemperatur T_g liegt zwischen 80 °C und 140 °C (Tabelle 2.5). Weiteren Quellen zufolge erweichen Nadelhölzer, entsprechend des Erweichungsbereichs ihrer Lignine, bei geringer Beanspruchungsfrequenz von 0,5 Hz bis 1,0 Hz bei ca. 92 °C und Laubhölzer bei ca. 82 °C, abnehmend bis ca. 65 °C (Olsson & Salmén 1997; Faix 2008, S. 63).

Tabelle 2.5: Erweichungstemperaturen der Holzarten Fichte (*Picea abies*) und Buche (*Fagus sylvatica*) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsfrequenz. Die Werte wurden unter wassergesättigten Bedingungen ermittelt. Ergänzt nach Havimo (2009).

Holzart	Methode	Belastung	Frequenz Hz	T_g °C	$\tan \delta_{max}$	Quelle
Buche	Torsion	transversal	0,5...3	80	0,38	Becker & Noack (1968)
Buche	Biegung	transversal	1	83	0,108	Placet et al. (2007)
Fichte	Torsion	transversal	0,6	92	0,27	Höglund et al. (1976)
Fichte	Torsion	longitudinal	2,0	95	0,14	Höglund et al. (1976)
Fichte	Zug-Druck	transversal	0,05...20	82...100	0,14...0,17	Salmén (1984)
Fichte	Torsion	transversal	350	110...120	0,30	Becker et al. (1977)
Fichte	Torsion	longitudinal	770	130...140	0,17	Becker et al. (1977)

Die Erwärmung führt außerdem zu einem oder mehreren Übergangs- bzw. Erweichungsbereichen, die durch einen Abfall der Elastizitäts- oder Schubmoduln sowie der mechanischen Dämpfung gekennzeichnet sind (Salmén 1984; Kelley et al. 1987). Weiterhin senkt die **Protein- und Pektinphase** mit einem Anteil von 15 % in der Primärwand die Erweichungstemperatur derselben unter die der ML und Sekundärwand (Salmén & Petterson 1995; Htun et al. 1993). Ob die Pektinphase in der thermomechanischen Faserstoffherzeugung eine Rolle spielt ist fraglich. Dagegen spricht, dass der Zellverbund unter Einwirkung von Pektinase nicht getrennt werden kann (Kürschner 1966, S. 36).

Infolge höherer Beanspruchungsfrequenz nimmt M' größere Werte an und der Verlustfaktor $\tan \delta_{max}$ sowie die Erweichungstemperatur T_g steigen an (Abbildung 2.4). Das bedeutet, dass trotz der Ligninerweichung zusätzlich mechanische Energie aufgrund der höheren **Beanspruchungsfrequenz** zwischen den Mahlscheiben in der mechanischen Zerfaserung aufgewendet werden muss, um den Zellverbund zu defibrillieren (Salmén 1984). Hinzu kommt eine höhere Erweichungstemperatur bei Belastung in tangentialer Richtung, im Vergleich zu radialer Belastung (Placet et al. 2007). Die Erweichungstemperatur steigt um 8 K in radialer Schnittrichtung und 12 K in longitudinaler Richtung bei Erhöhung der Beanspruchungsfrequenz um eine Zehnerpotenz (Becker et al. 1977).

Abbildung 2.4: Viskoelastische Eigenschaften der Holzarten Fichte und Buche in radialer Schnittrichtung als Funktion der Temperatur bis 95°C . **a**, Speichermodul (Storage modulus) und Verlustfaktor (Loss factor) (Placet et al. 2007). **b**, Die viskoelastischen Eigenschaften Elastizitätsmodul (Elastic modulus) und Verlustfaktor ($\tan \delta$) der Holzart Fichte in axialer Schnittrichtung als Funktion der Temperatur bis 160°C (Salmén et al. 1999).

Diese Verschiebung wird durch die Williams-Landel-Ferry (WLF) Gleichung beschrieben und ermöglicht die Berechnung der Zeit-Temperatur-Überlagerung im Bereich der Beanspruchungsfrequenz zwischen den Mahlscheiben im TMP-Verfahren (Salmén 1984; Irvine 1985). Die Beanspruchungsfrequenz durch Druckwechselbeanspruchung liegt in Abhängigkeit der Anzahl der Stege auf der Mahlscheibe und der Rotationsgeschwindigkeit zwischen ca. 3000 Hz und ca. 32.000 Hz. Irvine (1985) zufolge liegt die optimale Aufschlusstemperatur im TMP-Verfahren zwischen 130°C und 135°C . Unklar ist, wie hier der Zusammenhang zu $\tan \delta$ hergestellt und die Beanspruchungsfrequenz berechnet wurde. Die Interpretationen zum Mechanismus des experimentell ermittelten Erweichungsverhaltens auf submikroskopischer Betrachtungsebene reichen von linearen Zeit-Temperatur-Überlagerungen und unspezifischem Verhalten der Holzkomponenten über eine einstufige Erweichung der Lignine bis hin zu zwei getrennten Erweichungsbereichen, die den Hemizellulosen und Ligninen oder den kristallinen und amorphen Bereichen zugeordnet werden (Wert et al. 1984).

2.3.3 Wärmeleitung

Holz ist an sich ein schlechter Wärmeleiter (Kollmann 1987). Bei der Wärmeleitung führt ein Temperaturgefälle zum Strömen von Wärme in Form von Strahlung, Leitung und Konvektion. Als **Wärmeleitfähigkeit** λ wird der lineare Wärmestrom P durch ein Material mit der Dicke d über der Fläche A bei einem stationären Temperaturgefälle ΔT mit der entsprechenden Einheit

$\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ bezeichnet und nach Gleichung 2.2 berechnet.

$$\lambda = \frac{P \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad (2.2)$$

Es handelt sich bei der Wärmeleitung um eine temperaturabhängige Stoffkonstante, welche bei 20°C für Luft $\lambda = 0,025 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ und für Wasser $\lambda = 0,57 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ beträgt (Gerthsen et al. 2006, 232 f.). Die Wärmeleitfähigkeit des Holzes ist aufgrund der Ultrastruktur der Zellwand richtungs- und feuchteabhängig (Sonderegger et al. 2011). Die trockene Holzsubstanz ($\rho_w = 1.500 \text{ kg/m}^3$) nimmt bei 20°C Werte axial zur Faserorientierung von $\lambda_{w\parallel} = 0,484 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ und senkrecht zur Faserorientierung von $\lambda_{w\perp} = 0,312 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ an und liegt innerhalb der limitierenden Faktoren Luft und Wasser (Maku 1954).

In Dämmstoffen steht die Reduktion der Wärmeleitung im Vordergrund. In fein verteilten **Poren** wird der konvektive Anteil der Wärmeleitung vernachlässigbar klein und die geringe Wärmeleitfähigkeit der Luft kommt zur Geltung (Du et al. 2009; Manohar et al. 2012). Der Strahlungsanteil wird in Holzfaserdämmstoffen als vernachlässigbar klein angenommen (Kaemmerlen et al. 2010; Manohar et al. 2012). Damit ist die Wärmeleitfähigkeit hauptsächlich strukturell, also durch die Anordnung der Fasern, deren Dimension und das Netzwerk ihrer Kontaktflächen und Poren bedingt (Kollmann & Malmquist 1956). Wie in Abbildung 2.5 a ersichtlich ist, wird die Wärmeleitung durch die größere Kontaktfläche der Fasern im Vergleich zu Abbildung 2.5 b begünstigt.

Mathematisch greifbar, theoretisch begründet und experimentell bestätigt erscheint ein **Schichtmodell** aus den vier Elementen Holzsubstanz (Zellwand), absorbierte Feuchte, feine Poren (Lumen) und große Poren (Hohlräume zwischen den Fasern), das in Richtung des Wärmestroms in Serie geschaltet einen minimalen Wärmestrom und parallel geschaltet einen maximalen Wärmestrom erklärt. Dieses Modell soll zudem dazu geeignet sein, Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit zwischen Faserlängenverteilungen zu erklären (Kollmann & Malmquist 1956; Sekino 2016). Zusätzlich scheint auf Grundlage der geometrischen Fasergrößenverteilung eine Optimierung der Wärmeleitfähigkeit durch Vorhersage des Bereichs optimaler Dichte möglich (Manohar et al. 2012).

Abbildung 2.5: Schema der Anordnung röhrenförmiger Elemente in Gelegen: a, parallele Anordnung. b, sich kreuzende Anordnung. (Kollmann & Malmquist 1956).

3 Technologie der Faserstoffherzeugung

3.1 Holzvorbereitung

Die Holzvorbereitung zur Faserstoffherzeugung aus Laub- und Nadelholz umfasst Rohstoffauswahl, Rohstoffbeschaffung und Rohstoffaufbereitung. Insbesondere auf die Rohstoffaufbereitung kann vor der Faserstoffherzeugung prozesstechnisch Einfluss genommen werden. Das Ausgangsmaterial für die Zellstoff- und Holzstoffherzeugung ist, neben Sägewerks-Koppelprodukten wie Hackschnitzel, Spreißel und Schwarten, überwiegend entrindetes Rundholz. Zur **Entrindung** werden Trommelentrinder oder Einstamm-Rotor-Entrinder (Sägewerk) eingesetzt. Aus Rundholz werden **Hackschnitzel** mit Profilerspanern (Sägewerk), Scheibenhackern oder Trommelhackern hergestellt. Die Hackschnitzel werden anschließend sortiert, ggf. zwischengelagert und zum Teil gewaschen. Die Hackertypen haben Einfluss auf die Geometrie und die Größenverteilung der Hackschnitzel (Patt et al. 1981). Die Geometrie und die Größenverteilung beeinflussen speziell im RMP- und TMP-Verfahren wiederum den Durchsatz, die spezifische elektrische Leistungsaufnahme und die Beschaffenheit der erzeugten Faserstoffe (Franzén 1986).

3.2 Chemischer Aufschluss (Zellstoffherstellung)

Der chemische Aufschluss zielt auf die Delignifizierung der Holzsubsubstanz ab. Es werden zwei Verfahren von wirtschaftlicher Bedeutung unterschieden. Im sauren **Sulfitverfahren** wird das Lignin infolge der Sulfonierung mit Bisulfitionen (HSO_3^-) bei ca. 170 °C in Lösung gebracht. Die Hydrophilisierung der Ligninfragmente sorgt für die Löslichkeit in Wasser. Ein Teil der Hemizellulosen und der Zellulose wird durch die Reaktion ebenfalls hydrolisiert. Sulfitzellstoffe sind gut bleichbar. Die daraus hergestellten Papiere verfügen über eine geringere Festigkeit gegenüber solchen aus Sulfatzellstoffen. Die Zellstoffausbeute liegt bei 45 % bis 53 %. (Fischer & Bäurich 2013, S. 109 ff.)

Das weltweit dominierende chemische Aufschlussverfahren ist das alkalische **Sulfatverfahren**. Im Vergleich zum Sulfitverfahren werden damit Nadel- und Laubholzarten (hauptsächlich Kiefer und Eucalyptus) aufgeschlossen. Die Delignifizierung in der Kochflüssigkeit erfolgt durch Hydrogensulfidionen (SH^-) bei ca. 150 °C. Hemizellulosen und monomere Saccharide aus der Zellulose werden ebenfalls teilweise hydrolisiert. Die gegenläufige Ligninkondensation bedingt die dunkle Farbe der Sulfatzellstoffe und erschwert deren Bleiche. Sulfatzellstoffe liefern hohe Festigkeiten. Die Zellstoffausbeute liegt zwischen 42 % und 50 %. (Fischer & Bäurich 2013, S. 130 ff.)

3.3 Mechanische Faserstoffherzeugung

3.3.1 Holzschliff

Das älteste und wirtschaftlich immer noch bedeutsame Prinzip der mechanischen Zerfaserung von Holz ist das Pressen von Rundholz an einen im Wasserbad rotierenden Schleifstein (Vehniäinen

2008). Im Holzschliff wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt, welche heute ausschließlich auf die **Papierherstellung** begrenzt sind. Durch die Tatsache, dass die Temperatur in der Schleifzone ohne zusätzlich Erwärmung auf über 100° C ansteigt, kann die Holzschlifferzeugung als thermomechanischer Prozess charakterisiert werden (Atack & Pye 1964). Einen Eindruck zum Vorgang der mechanischen Zerfaserung vermittelt Abbildung 3.1. Ein Vergleich unterschiedlicher mechanischer Verfahren hinsichtlich der Aufschlussstemperatur und der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme ist in Tabelle 3.1 gegeben.

Tabelle 3.1: Übersicht mechanischer Verfahren zur Holzstoffherzeugung mit Aufschlussstemperatur und spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme.

Verfahren	Temperatur °C	SEL kWh/t _{atro}	Quelle
Holzschliff*	bis 140	1300...2100	Liimatainen et al. (1999)
RMP*	90...110	2100...2400	Tienvieri et al. (1999)
TMP*	120...140	2100...2400	Tienvieri et al. (1999)
TMP für MDF	160...185	80...170	Roll (2008)
CTMP*	120...140	1000...2500	Lindholm & Kurdin (1999)

* Verfahren der Papierherstellung

Abbildung 3.1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Holzoberfläche von Fichte (Picea mariana) aus dem Holzschliff. Einzelne Tracheiden werden aus dem Faserverbund separiert. Das Holzstrahlparenchym (Pfeilspitze) kann nicht definiert zerfasert werden. Der Pfeil zeigt die Schleifrichtung an. (Atack1977S.).

3.3.2 RMP-Verfahren

Die mechanische Zerfaserung basiert auf der Absorption von Energie durch den Zellverbund infolge dynamischer Druck- und Scherbeanspruchung (vgl. Abschnitt 2.3.2). Diese Funktionsweise wird auch im Refiner Mechanical Pulp Verfahren (RMP-Verfahren) mit Mahlscheiben genutzt. Mit dem RMP-Verfahren wurde die Rohstoffbasis in der Papierindustrie durch nicht für den Holzschliff geeignete Holzsortimente, Sägewerkskoppelprodukte (Hackschnitzel) und Laubhölzer wirtschaftlich vorteilhaft erweitert (Keays & Leask 1973). Aus den 1950er Jahren sind erste Versuche zur

Herstellung von Zeitungspapierstoffen mit Doppelscheiben- und Einscheiben-Reibungsmühlen (Refiner) bekannt, die unter **Atmosphärendruck** und mit offenem Faserauslass betrieben wurden (Carpenter 1989, S. 31; Sorensen 1915; Eberhardt 1960). Diese RMP-Refiner wurden auch mit Schraubenpressen und Extrudern als erste Stufe der Zerfaserung kombiniert (Eberhardt 1955). 1961 wurde, neben zahlreichen weiteren erfolgreichen industriellen Anlagen, ein 48" RMP-Refiner mit einem Durchsatz von 400 t/d installiert (Leask 1968). Im Weiteren wurden solche Anlagen auch mit **Druckvorwärmung** und anschließender druckloser Zerfaserung betrieben (Peterson & Dahlquist 1975).

Das RMP-Verfahren wurde vom Thermomechanical Pulp Verfahren (TMP-Verfahren) wegen dessen, für die Papierherstellung besser geeigneten Fasereigenschaften verdrängt und ist heute selten (Vehniäinen 2008). Einzelne Spezialanwendungen sind noch in der Spanplattenherstellung (USA), der Pflanzsubstratherstellung und in der Zerfaserung von Einjahrespflanzen zu finden. Beim RMP-Verfahren handelt es sich um einen thermomechanischen Prozess, in dem kein zusätzlicher Dampf zur Erwärmung erforderlich ist. Die für die mechanische Zerfaserung eingesetzte elektrische Energie wird teilweise durch Reibungsarbeit zwischen den Mahlscheiben in Wärme umgewandelt und der dabei entstehende Dampf kann zur Erwärmung der Hackschnitzel genutzt werden (Abbildung 3.2) (Asplund 1940b). In Abbildung 6.2 ist die Laborrefineranlage in RMP-Konfiguration, mit der die experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, schematisch dargestellt und erläutert.

Abbildung 3.2: Versuche mit einer RMP-Laboranlage am Forest Research Institute, Rotorua, Neuseeland. (Anonym 1974).

3.3.3 TMP-Verfahren

Thermomechanical Pulp (TMP) wurde erstmals im Jahr 1934 im industriellen Maßstab hergestellt (Asplund 1940b). Die Anwendung blieb zunächst auf die Herstellung von Isolierplatten, Hartfaserplatten und losen Fasern zur Isolierung (heute: Einblasdämmung) beschränkt. Die Produktionsmenge betrug 1939 in Schweden 120.000 t/a und 100.000 t/a in den USA (Lowgren 1941). Als **Rohstoffe** wurden Kiefer, Fichte und weitere Nadelhölzer sowie Espe, Ahorn, Pappel und Eiche verwendet. Die Zerkleinerung von Weizenstroh und Bagasse war bereits bekannt und im industriellen Einsatz (Lowgren 1941; Asplund 1940b).

Die erste industrielle MDF-Anlage folgte im Jahr 1965 (Lein 1978). Im Jahr 1968 wurde das TMP-Verfahren in die Papierherstellung übertragen (Ahrel & Bäck 1970). Grundlegende Entwicklungsschritte in der Technologie sind seither nicht bekannt geworden. Verbesserungen wurden in den letzten Jahren in der **Prozessführung** und -kontrolle und insbesondere im Mahlscheibendesign für die MDF-Produktion erzielt (Ladenburger 2010; Gao 2014). Aus der MDF-Herstellung ist der Einsatz von Laubholz und Einjahrespflanzen bekannt (Deppe & Ernst 1996, 27 ff.).

Der TMP-Prozess in der MDF- und **Holzfaserdämmstoffherstellung** unterscheidet sich von dem TMP-Verfahren der Papierherstellung hinsichtlich des Trockenverfahrens in der Matten- und Plattenherstellung. Die Verfahrensschritte zur thermomechanischen Faserstoffherzeugung in der Holzwerkstoffherstellung unterscheiden sich nicht wesentlich. In der Holzfaserdämmstoffherstellung werden Hackschnitzel mit atmosphärischem Dampf im Vorkocher auf ca. 90 °C vorgewärmt und über eine Stopfschnecke in den Druckbehälter (Kocher) der Refineranlage gefördert. In diesem Prozessschritt wird freies Wasser in den Hackschnitzeln und ein beträchtlicher Teil der Extraktstoffe abgequetscht (Sandberg et al. 2020). Je nach Kompressionsgrad erfolgt auch eine **mechanische Vorbehandlung**.

In Abbildung 3.3 ist ersichtlich, dass die Struktur der Hackschnitzel in der Stopfschnecke verändert wurde. Das Material hat seinen „schnitteligen“ Charakter verloren, ist vorzerkleinert und teilweise aufgefaserter worden. Der Einfluss auf die Beschaffenheit der Faserstoffe durch die Beschädigung der Faserstruktur wurde im Kontext der Papierherstellung untersucht (Sabourin 2003). Durch eine mechanische Vorbehandlung sinkt der elektrische Energiebedarf in der Zerkleinerung um 10% bis 30 % (Gorski et al. 2010).

Abbildung 3.3: Blick von oben in den geöffneten Kocher einer kontinuierlich betriebenen Laborrefineranlage (Typ Andritz 12-1CP). Die Hackschnitzel werden von rechts mit der Stopfschnecke in den Druckbehälter gefördert. In der Mitte ist der Kegel des Rückschlagventils zu sehen. Auffällig ist die starke Vorzerkleinerung der Hackschnitzel durch die Stopfschnecke. (IAP Industrieanlagen-Planungsgesellschaft m.b.H.).

Im Kocher werden die Hackschnitzel mit einer Sattedampf Temperatur von ca. 150 °C bis ca. 180 °C für ca. 3 min bis ca. 6 min erwärmt. Anschließend erfolgt die Zerkleinerung typischerweise in einem **Einscheibenrefiner** (Rotor/Stator) mit einer Kapazität von bis zu 8 t_{atro}/h bei Mahlscheibendurchmessern bis zu 48".

Charakteristisch für das TMP-Verfahren in der Holzfaserdämmstoffherstellung ist eine direkte Verbindung zwischen Kocher und Refiner (Tienvieri et al. 1999, S. 160). Die Differenz des Sattedampfdrucks zwischen Kocher und Mahlraum kann geregelt werden und bestimmt die **Verweilzeit** des Materials zwischen den Mahlscheiben mit. In die Blasleitung werden Additive zur Hydrophobierung sowie Flammenschutzmittel dosiert. Anschließend werden die Faserstoffe in einem Stromrohtrockner getrocknet. In der industriellen Praxis variieren die Parameter der Prozessschritte rohstoff- und herstellerabhängig. Der höhere Gesamtenergieaufwand im TMP-Verfahren im Vergleich zu RMP oder Holzschliff wird durch die Dampferzeugung und Trocknung verursacht (Atack 1976; Htun et al. 1993, S. 1088).

In Abbildung 6.1 ist die Laborrefineranlage in TMP-Konfiguration, mit der die experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, schematisch dargestellt und erläutert.

3.3.4 CTMP-Verfahren

Die Anlagen zur Herstellung von Chemi-Thermomechanical Pulp (CTMP) gleichen denen des TMP-Verfahrens der Papierherstellung (Petit-Conil et al. 2016, S. 178). Der entscheidende Unterschied ist, dass im CTMP-Verfahren zusätzlich zur thermischen Energie auch chemische Energie für die Erweichung der Holzmatrix eingesetzt wird. Die überwiegende chemische Behandlung ist die

milde Sulfonierung mit Natriumsulfit bei Nadelholz sowie Natriumsulfit und/oder Natronlauge bei Laubholz (Lindholm & Kurdin 1999, S. 224). Die Herstellung und Verwendung von CTMP ist in der Holzwerkstoffherstellung nicht von Bedeutung (Roffael et al. 1994a).

3.4 Mahlscheiben

3.4.1 Konstruktionsmerkmale

Die Mahlscheibe ist im RMP- und TMP-Verfahren das Werkzeug zur Zerfaserung des Holzes. Die produkt- und prozessspezifische Auslegung von Mahlscheiben führt zu einer Verbesserung der Beschaffenheit der Faserstoffe im Sinne der übergeordneten Produkteigenschaften (Deppe & Ernst 1996, S. 54, 68). Darüber hinaus ist bekannt, dass geeignete Mahlscheibenmuster die spezifische elektrische Leistungsaufnahme in der Faserstofferzeugung für die Herstellung von MDF senken können (Börste 2008).

Die Papierherstellung stellt global den größten Einsatzbereich von Refinern und Mahlscheiben dar. Neben der Faserstofferzeugung im TMP-Verfahren werden Mahlscheiben hier außerdem verwendet, um Rejektstoffe zu behandeln oder die Eigenschaften der Holz- oder Zellstofffasern, wie Flexibilität, Faser-zu-Faser-Bindung und Faserkürzung durch eine Nachmahlung für die entsprechenden Papiersorten vorzubereiten (Annergren & Hagen 2016). Die Faserstoffe befinden sich dazu in **Wassersuspension** mit geringem Feststoffanteil (LC-Refining). Im Gegensatz zur Holzwerkstoffindustrie werden Mahlscheiben für die Papierherstellung seit längerem intensiv wissenschaftlich untersucht und weiterentwickelt (Guo et al. 2020). Forschungsergebnisse oder Methoden zur Mahlscheibenentwicklung lassen sich aufgrund der unterschiedlichen Prozess- und Produktspezifikationen nicht auf die Holzfaserdämmstoffherstellung übertragen.

Mahlscheiben für das TMP-Verfahren werden im Formguss-Verfahren hergestellt. Die Laufzeit hängt vom verwendeten Holzsortiment sowie der Effizienz einer ggf. vorhandenen Hackschnitzelwäsche ab und liegt typischerweise zwischen 1000 und 3000 Betriebsstunden. Der **Verschleiß** erfolgt durch Abrunden und Abtragen der Stege. Mit der Abnutzung nimmt die Faserlänge und die spezifische elektrische Leistungsaufnahme zu. Die Oberflächenhärte wird durch martensitische Legierungen eingestellt (0,2 % - 3 % C und 15 %-30 % Cr) (Tienvieri et al. 1999, S. 189).

Die wesentlichen **Konstruktionsmerkmale** sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Vorbrecher zerkleinern das Material grob vor. Anzahl, Winkel, Krümmung und Breite der Stege im Verhältnis zu den Nuten sind die typischen Parameter, um die Mahlscheibe produkt- und prozessspezifisch anzupassen. Über den Stegwinkel kann, ähnlich wie in einer Pumpe, gezielt der Transport des Materials im Mahlpalt und die Verweilzeit zwischen den Mahlscheiben angepasst werden. Die Anzahl der Stege nimmt zur Peripherie der Mahlscheibe im Regelfall zu. Die Oberfläche der Stege wird präzisionsgeschliffen, um den Mahlpalt im Bereich weniger Zehntelmillimeter genau einstellen zu können. An den Befestigungspunkten werden die Ringsegmente auf dem Mahlscheibenhalter befestigt. Die Dämme unterhalb der Stegoberfläche (U-Damm) dienen zur Verstärkung der Stege. Die Dämme auf Höhe der Stege zwingen das Material in den Mahlpalt.

In Abbildung 3.5 sind fünf **Mahlscheibentypen** abgebildet. Bei Abbildung 3.5 a handelt es sich um einen Mahlscheibentyp, mit dem Tests im RMP-Verfahren von Holzer et al. (1962) durchgeführt wurden. Hierbei handelt es sich um ein bidirektionales Design, das hauptsächlich in der Papierherstellung verwendet wird, aber auch in der MDF- und Holzfaserdämmstoffherstellung verbreitet war. Die Drehrichtung ist nicht vorgegeben und kann reversiert werden. In Abbildung 3.5 b sind die Stege im Winkel parallel angeordnet. Aus der Rotation des Rotors über dem Stator ergibt sich hieraus ein breites Spektrum an Stegwinkeln. Die Stege müssen durch Korrektur-

Abbildung 3.4: Die wesentlichen Konstruktionsmerkmale einer Mahlscheibe, dargestellt am Ringsegment eines Rotors. Der Pfeil oberhalb zeigt in Rotationsrichtung. Die Pfeile auf der Mahlbahn stellen den Materialfluss dar. Ergänzt nach T. Michel (2017).

winkel der Kreisform angepasst werden. Das Spiraldesign in Abbildung 3.5 c bietet den Vorteil, dass über die Länge des Steges stets der gleiche Winkel zwischen den Stegen des Rotors und des Stators anliegt. Eine Weiterentwicklung des Spiraldesigns stellt Abbildung 3.5 d dar. Hierbei handelt es sich um den Stand der Technik im Bereich der MDF-Herstellung. Eine aktuelle TMP-Mahlscheibe für die Papierherstellung mit Doppelscheibenrefinern in Abbildung 3.5 e weist im Vergleich eine deutlich höhere Anzahl an Stegen auf. Der elektrische Energiebedarf liegt hier rund zehnmal höher als bei MDF. In der Vergangenheit wurden in der Holzfaserdämmstoffherstellung unspezifische Mahlscheiben oder ältere MDF-Typen wie das bidirektionale oder das parallele Design verwendet (persönliche Erfahrung aus Gesprächen, Werksbesichtigungen und Mahlscheibentests mit Holzfaserdämmstoffherstellern). Speziell entwickelte Mahlscheiben für die Holzfaserdämmstoffherstellung sind nicht bekannt.

3.4.2 Zerfaserungskinetik

Vom Standpunkt der mechanischen Verfahrenstechnik aus, handelt es sich bei der mechanischen Faserstoffherzeugung um einen **Zerteilprozess** (Zerkleinerung) (Schönert 2003, S. 268). Demzufolge ist die Zerfaserung von Holz das Ergebnis des Überwindens molekularer Bindungskräfte im Zellverbund, welches durch den elektrischen Energieaufwand quantifiziert wird. Eine Hypothese für die Entstehung spezifischer **Partikelgrößenverteilungen** und -formen lautet: Die Zerfaserung findet in dem, zwischen Rotor und Stator komprimierten, Faserstoffpolster durch Scherbeanspruchung statt (Illikainen et al. 2008, 2010). Die Zerkleinerungskinetik der profilierten Mahlscheibe erzeugt Spannungen im Holz, durch welche die Zerkleinerung (Dispersität) im scheibenförmigen **Mahlspalt** in radialer Richtung zeitlich zunimmt. Der Abstand zwischen Rotor und Stator hat dabei eine Klassierwirkung, denn lediglich Partikel, die kleiner oder feiner sind als der Mahlspalt, können den Mahlraum verlassen.

Neben der Zerkleinerungsfunktion besitzen die Mahlscheiben auch eine Transportfunktion. Das zentral aufgegebene Mahlgut wird durch die vom Rotor erzeugte Zentrifugalkraft in Richtung Peripherie befördert. In den Nuten des Stators strömt, durch den zwischen den Mahlscheiben entstehenden Dampf, das Material teilweise in Richtung Zentrum zurück (Atack et al. 1984, 1989; Miles & May 1990). Die Auswertung hochfrequenter Filmaufnahmen vermittelt eine Vorstellung über die komplexen **Partikelbewegungen** (Atack et al. 1989; T. S. Fox et al. 1979). Es sind Versuche bekannt, einzelne Aspekte der komplexen Wechselwirkungen in der Zerfaserung im TMP-Verfahren mathematisch zu fassen. Dazu zählt zum Beispiel die Intensität (Kerekes 2015). Auf die Entwicklung von Mahlscheiben für die Holzfaserdämmstoffherstellung sind solche Modelle aufgrund der grundlegend unterschiedlichen Applikationen und der weitgehend unbekannten Zusammenhänge zwischen Rohstoff, Zerfaserungsparametern, Dispersitätseigenschaften und der maßgeblichen Produkteigenschaft Wärmeleitfähigkeit nicht übertragbar.

Nach Antensteiner (2002) und Schönert (2003, S. 365) kann die **spezifische elektrische Leistungsaufnahme** des Refiner-Antriebmotors in der thermomechanischen Faserstoffherzeugung unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte berechnet werden. Die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung setzt sich wie in Gleichung 3.1 dargestellt zusammen.

$$P_{ref} = P_{el} - P_{NT} \quad (3.1)$$

P_{ref}	Elektrische Nettoleistung in kW
P_{el}	Elektrische Leistung des Motors in kW
P_{NT}	Elektrische no-treatment Leistung in kW

Die no-treatment Leistung berücksichtigt die mechanischen Verluste (Leerlaufleistung) wenn keine Zerfaserung stattfindet, aber Dampfdruck anliegt. Die ausschlaggebende Messgröße ist die spezifische elektrische Leistungsaufnahme des Refiner-Antriebmotors nach Gleichung 3.2, welche auf den Massenfluss des Mahlguts bezogen ist.

$$P_{spez} = \frac{P_{ref}}{\dot{M}_{atro}} \quad (3.2)$$

P_{spez}	spezifische elektrische Leistungsaufnahme in Wh/kg _{atro}
P_{ref}	elektrische Nettoleistung in W
$\dot{M}_{atro}$	Massenfluss Holz in kg _{atro} /h

3.4.3 Simulation

Die Entwicklung von Mahlscheiben ist geprägt durch Erfahrung und experimentelle Mahlscheibentests. Für die Simulation zur Entwicklung von Mahlscheiben sind unter anderem folgende Randbedingungen zu beachten: Das Mahlgut Holz stellt im TMP-Verfahren ein **Drei-Phasen-Gemisch** aus der festen Phase Holz, der flüssigen Phase Holzfeuchte (Wasser) sowie der dispersen Phase Dampf dar. Die feste Phase Holz ist ein poröser, heterogener, anisotroper, viskoelastischer Mehrschichtenverbund, dessen Struktur und chemische Konstitution holzarten- sowie standortabhängig variiert. Die disperse Phase Dampf ist kompressibel und bewegt sich auf der labilen Satttdampflinie. Außerdem beinhaltet diese Komponente **Druck- und Temperaturwechselwirkungen** mit der festen und flüssigen Phase. Die interessanten Größen bei der Simulation zur Entwicklung von Mahlscheiben sind die erzeugten Dispersitätseigenschaften der Faserstoffe und die spezifische elektrische Leistungsaufnahme. Hier sind die keine nennenswerten Erfolge durch Simulation von Mahlscheiben bekannt (Eriksson & Karlstroem 2009; Muhic et al. 2011; Wang et al. 2017; Sandberg et al. 2020; Talebjedi et al. 2020; Tian 2020).

Abbildung 3.5: Übersicht über Entwicklungen im Mahlscheibendesign anhand unterschiedlicher Typen: **a**, Bidirektionales Design u.a. für das RMP-Verfahren (Holzer et al. 1962). **b**, Paralleles Design (eigene Aufnahme). **c**, Spiraldesign (eigene Aufnahme). **d**, Modernes MDF Design (Gao 2014). **e**, Modernes TMP Design (Muhic et al. 2011).

4 Charakterisierung der Beschaffenheit von Faserstoffen

4.1 Zusammensetzung und ausgewählte Eigenschaften

Im Bereich der Holzwerkstofftechnik wird im Zusammenhang mit der Faserstofferzeugung generell von Holzfasern gesprochen. Der in der Papiertechnik synonym verwendete Begriff Holzstoff deutet auf den nahezu vollständig erhaltenen Ligninanteil hin. Für die Charakterisierung der Beschaffenheit von mechanisch erzeugten Faserstoffen impliziert der Begriff **Hochausbeute-faserstoff** den vergleichsweise geringen, thermisch induzierten Massenverlust von 4 % bis 6 % im RMP-Verfahren und von 6 % bis 9 % im TMP-Verfahren (Petit-Conil et al. 2016, S. 173). Im Weiteren bezieht die Bezeichnung auch die anatomischen Merkmale der mikroskopischen Betrachtungsebene des Holzgewebes mit ein (vgl. Abschnitt 2.1.2). Die Prozessführung im RMP- und TMP-Verfahren beeinflusst zwar die Trennung des Zellverbunds und bestimmt maßgeblich Faserstoffeigenschaften wie die Steifheit sowie die chemische und physikalische Morphologie der Oberfläche (Fernando & G. Daniel 2008; Salmén et al. 1999, S. 36). Die **Zusammensetzung** der Faserstoffe ist indessen durch die holzartenspezifische Ausprägung und Variabilität des Holzgewebes größtenteils vorgegeben (Heikkurinen & Leskelä 1999, 369 ff.).

In einem verfahrenstechnischen Sinn umfasst die Definition des Begriffs Holzfaser (Faserstoff) folglich nach Karnis (1994) & Forgacs (1963) und Heinemann (2013, S. 96) ein heterogenes Gemisch aus:

- Splitter: Spanförmige Faserbündel, die in der Dicke aus 30 und mehr Zellen bestehen.
- Faserbündel: Aggregate und deren Bruchstücke, die in der Dicke aus 2 bis 30 und mehr Zellen bestehen und teilweise aufgefaserter sind sowie Agglomerate.
- Langfaser: Primärpartikel wie Tracheiden, Librifasern und Fasertracheiden
- Kurzfaser: Sekundärpartikel aus angeschnittenen, zerteilten oder delaminierten Einzelfasern sowie Parenchym.
- Feinstoff: Fragmente von Einzelfasern, der Mittellamelle und der delaminierten Zellwand, separierte Tüpfel.

Die **physikalische Oberflächenmorphologie** der Faserstoffe hängt unter anderem mit der Aufschlussstemperatur zusammen. Bei hohen Aufschlussstemperaturen (170 °C) weisen Nadelholztracheiden eine glatte und weitgehend intakte Zellwand auf (Atack 1972). Bei niedrigeren Aufschlussstemperaturen (110 °C bis 135 °C) sind die Primärwand und die S1-Schicht teilweise vollständig flöckchen- und plättchenförmig abgelöst. Die S2-Schicht delaminiert bündchenförmig, was auch als externe Fibrillierung sichtbar wird (Koran 1970; Fernando & G. Daniel 2004). In Abbildung 4.1 werden die angesprochenen prinzipiellen morphologischen Eigenschaften mechanischer Faserstoffe im Vergleich mit chemisch aufgeschlossenem Zellstoff dargestellt.

Abbildung 4.1: Mikroskopische Aufnahme für den qualitativen Vergleich von Holzschliff (links) als Beispiel für die mechanische Zerkleinerung und Zellstoff (rechts). Im Holzschliff sind zahlreiche Bestandteile der Zellwand als kleinere und feinere Partikel enthalten. (Kerekes 2015).

Eine weitere erwähnenswerte Eigenschaft im Zusammenhang mit der Charakterisierung der Beschaffenheit von Refiner-Faserstoffen ist die **Latenz**. Damit wird das Phänomen des Verdrehens und Kräuselns der Fasern während der Faserstoffherzeugung bezeichnet. Denn diese Verformungen bleiben durch Abkühlen bei hoher Konsistenz erhalten (Htun et al. 1988).

4.2 Dispersitätseigenschaften und Partikelmessetechnik

Vom Standpunkt der mechanischen Verfahrenstechnik aus, handelt es sich bei der Faserstoffherzeugung um einen Zerteilprozess (s. Abschnitt 3.4.2) (Schönert 2003, S. 268). Die fundamentale Zielgröße bei der Zerkleinerung ist die Partikelgrößenverteilung (Bohnet 2004, S. 9). Das erzeugte **Partikelkollektiv** (disperses System) ist aus der dispersen Phase der Einzelpartikel und der kontinuierlichen Phase des umgebenden Mediums (im Prozess) zusammengesetzt (Stieß 2009, S. 9). Mit Partikelkollektiv kann im Zusammenhang mit der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen folglich das heterogene Gemisch der Faserstoffe überschrieben werden, welches sich in Luft (Trockenverfahren) oder Wasser (Nassverfahren) befindet. Die Charakterisierung disperser Systeme hat unter anderem zum Ziel:

1. Die Auswirkung mechanischer Prozesse anhand der Dispersitätseigenschaften zu beurteilen (Bohnet 2004, S. 4). Im vorliegenden Fall betrifft das die Untersuchungen zur Faserstoffherzeugung im RMP- und TMP-Verfahren mit unterschiedlichen Mahlscheiben.
2. Funktionale Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Dispersitätseigenschaften und bestimmten Produkteigenschaften im Sinne einer Eigenschaftsfunktion zu identifizieren (Rumpf 1967). Im vorliegenden Fall gilt das für die Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit der im RMP- und TMP-Verfahren mit unterschiedlichen Mahlscheiben erzeugten Faserstoffe.

Ist bekannt, welche Dispersitätsgrößen die gewünschten Produkteigenschaften ergeben, kann der Prozess darauf eingestellt und optimiert werden. Bei Holzfaserdämmstoffen sind die Dispersitätseigenschaften wissenschaftlich unzureichend untersucht und es ist, abgesehen von der industriellen Praxis, weitgehend unklar, ob die angestrebten Produkteigenschaften mit anderen Rohstoffen und Verfahren energetisch und wirtschaftlich günstiger erreicht werden können. Die **Messaufgabe** vor dem Hintergrund der Prozessgestaltung besteht darin, relevante Größen und

ihre Verteilung zur Beschreibung des dispersen Systems zu erkennen. In der Partikelmesstechnik werden hierzu unter anderem grundsätzlich Siebverfahren zur Analyse der Größenverteilung von Partikelkollektiven sowie optische Verfahren für die Größen- und Formanalysen einzelner Partikel unterschieden (Stieß 2009, S. 161).

Aufgrund der Fokussierung auf das Trockenverfahren in der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen scheiden Partikelmesssysteme in wässriger Dispersion u.a. wegen der zu erwartenden Entfernung der Latenz und die nicht repräsentative Auflösung von Agglomeraten aus. Hinzu kommt, dass diese Messsysteme aus der Papier- und Zellstoffindustrie nicht bei MDF angewendet werden können (Roffael et al. 1994a; Weber et al. 2014). Für die Charakterisierung von trockenen Faserstoffen in Luft steht eine begrenzte Auswahl an Methoden zur Verfügung, die in der industriellen, wie in der Laborpraxis weder allgemein anerkannt und akzeptiert noch vollständig entwickelt oder standardisiert sind.

Als Trockensiebung kommt die **Luftstrahl-Prüfsiebung** in der MDF- und Holzfaserdämmstoffherstellung zur gravimetrischen Ermittlung der Größenverteilung zur Anwendung (Ladenburger 2010; Gao 2014). Die unter dem Prüfsieb rotierende Schlitzdüse sorgt durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit des eintretenden Luftstrahls für eine hohe Dispergierleistung sowie den pneumatischen Transport des Feinanteils durch die Siebmaschen (Schmidt et al. 2003, S. 146). Die Luftstrahl-Prüfsiebung charakterisiert das Partikelkollektiv in seiner Gesamtheit. Die messbare Dispersitätsgröße ist die geometrische Abmessung der Partikel mit der Maschenweite des Siebgebewebes als Trenngrenze. Schirp et al. (2015) erkannten, dass zwischen der Luftstrahl-Prüfsiebung nach EN ISO 4610:2001 (2002) und optischen Verfahren in der Analyse von MDF-Faserstoffen vermutlich keine Vergleichbarkeit besteht. Krug (2010, S. 117) und Wenderdel & Krug (2012) wiesen mit dem Luftstrahlsieb eine deutliche Differenzierung von Kiefern-Faserstoffen nach der Verweilzeit, der Aufschlusstemperatur und dem Mahlpalt nach. Unveröffentlichte Ergebnisse aus der Holzwerkstoffindustrie weisen der Luftstrahl-Prüfsiebung eine hohe Präzision durch einen geringen Variationskoeffizienten nach, was den Zeitaufwand der Analyse relativiert. Der Zeitaufwand kann außerdem durch den Einsatz von Prüfmaschinen für beliebig viele Fraktionen erheblich reduziert werden (Wahler 1960; Schmidt & Coppers 1998). Neben der Luftstrahlsiebung eignet sich auch die trockene Siebfraktionierung mit Plansiebprüfmaschinen und Siebhilfen (Jensen 1975).

Optische Verfahren in Kombination mit **quantitativer Bildanalyse** bieten als Individualmethode umfangreichere Informationen durch geometrische Abmessungen als Dispersitätsgröße. Als optische Verfahren zur trockenen Charakterisierung von Faserstoffen im TMP-Verfahren sind u.a. die zweidimensional abbildenden Systeme FibreView, FibreCube und FibreShape bekannt. Das System FibreView kommt inline in der MDF-Herstellung zum Einsatz und identifiziert Faserbündel auf der Faservliesoberfläche (Hasener 2013). Das System FibreCube wurde ebenfalls für die inline Fasercharakterisierung entwickelt. Benthien et al. (2014) wiesen damit nach, dass die Fasergröße mit steigender Verweilzeit und Temperatur abnimmt. Mit demselben System untersuchten Benthien et al. (2017) auch die Einflüsse auf die Fasergrößenverteilung und arbeiteten heraus, dass Holzart und Mahlpalt den größten Einfluss haben. Das am Laboreinsatz orientierte FibreShape-System ist ein statisches System, das auch für die Charakterisierung von Faserstoffen für die Holzfaserdämmstoffanalyse eingesetzt wird (Imken et al. 2021). Schirp et al. (2014, 2015) verwendeten eine Anzahl- sowie Flächengewichtung und konnten zeigen, dass das System für die Analyse der Länge, Breite und Konvexität von TMP-Faserstoffen geeignet ist.

In puncto Methodik zur Charakterisierung von Faserstoffen sind die Arbeiten von Wenderdel et al. (2014, 2016b) und Wenderdel et al. (2017) erwähnenswert. Hierin werden Kriterien, ähnlich wie in Karnis (1994) & Forgacs (1963) zur Klassierung der Partikeltypen Staub, Einzelfaser und Faserbün-

del mit Unterklassen eingeführt (Abschnitt 4.1). Die Analyse erfolgte mit einer Kombination aus QualScan- und CamSizer-System in wässriger Dispersion mit Volumen-Gewichtung. Weiterhin zeigte Wenderdel (2015), dass die Differenzierung nach Partikeltypen vorteilhaft für die Ermittlung von funktionalen Zusammenhängen und Korrelationen zwischen Dispersitätseigenschaften und bestimmten Produkteigenschaften ist.

4.3 Mikroskopische Untersuchungen

In Konsequenz der Faserstoffherzeugung nach dem RMP- und TMP-Verfahren ist die Struktur der Zellwand teilweise mechanisch deformiert und intern fibrilliert (Heikkurinen & Leskelä 1999, S. 407). Diese **strukturellen Veränderungen** infolge der mechanischen Beanspruchung können durch eine zweifarbige differenzielle Färbung (Simons' stain) sichtbar gemacht werden (Simon 1950). In der Papiertechnik und in der Biotechnologie ist diese Methode anerkannt und verbreitet (Heikkurinen & Leskelä 1999, S. 407; Meng et al. 2013; Blanchette et al. 1992). Der Mechanismus wird von Yu et al. (1995) folgendermaßen erklärt: Die geringe Molekülgröße des blauen Farbstoffs erzeugt eine graduelle Farbtiefe infolge der Zugänglichkeit der inneren Oberfläche der Zellwand. Überschreitet die Größe der Mikroporen die Molekülgröße des orangenen Farbstoffs (5 nm), erscheinen diese Regionen aufgrund der höheren Affinität orange. Eine breite Größenverteilung der Mikroporen färbt die Fasern grünlich (Yu et al. 1995). Weiterhin stellten Esteghlalian et al. (2001) fest, dass gebleichte Zellstofffasern orange gefärbt werden, was auf die verbesserte Zugänglichkeit der interfibrillären Hohlräumen zurückzuführen ist. Die Methode scheint sich zur quantitativen Erfassung von Deformation und Fibrillierung von TMP-Faserstoffen zu eignen (Fernando & G. Daniel 2010). Papiertechnische Untersuchungen an verschiedenen Nadelhölzern und Laubholz (*Populus tremuloides*) sind bekannt (Akhtar et al. 1995). Die Anwendung an Buchenholz und die Charakterisierung von RMP- sowie TMP-Faserstoffen mit höherer Aufschlussstemperatur sind nicht bekannt.

5 Herstellung und ausgewählte Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen

5.1 Rohstoffe, Zusatzstoffe, Hilfsstoffe und Klebstoffe

Den Angaben in den technischen Datenblättern der Holzfaserdämmstoffhersteller zufolge kommt in der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen ausschließlich Nadelholz (Kiefer, Fichte, Tanne) zum Einsatz. Dabei wird überwiegend auf **Nadelrundholz** zurückgegriffen. Von einem Hersteller ist der Einsatz von Sägewerks-Koppelprodukten bekannt. Die Eignung von Fichtenholz für Holzfaserdämmstoffe legen bereits Untersuchungen von Kollmann & Malmquist (1956) und Richter (1993) nahe. Aus mehreren Forschungsvorhaben ist die Eignung von **Laubholzsortimenten** für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen bekannt geworden. So stellt Heinrich (2004) fest, dass Faserstoffe aus Buche und Pappel eine vergleichbare Wärmeleitfähigkeit wie Faserstoffe aus Fichte und Kiefer besitzen. Bartholme et al. (2009) und Brombacher (2015) wiesen die Eignung von Buchen-Faserstoffen und daraus hergestellter Dämmstoffe nach. Nach Eichhorn (2017) eignet sich sogar Eichenholz-Faserstoff als Dämmstoff. Die Untersuchungen von Vignon et al. (2016) zeigen die Eignung von Pappel als Rohstoff für die Holzfaserdämmstoffherstellung durch die niedrigere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Kiefer und den niedrigeren elektrischen Energieaufwand in der Zerfaserung hin. Barth (2017, 2018) weist ebenfalls auf die technologischen und ökonomischen Vorteile der Verwendung von Buchenholz in der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen hin.

In der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen kommen diverse **Zusatzstoffe** zur Einstellung bestimmter Produkteigenschaften zum Einsatz. Dazu zählen hauptsächlich Paraffine als Hydrophobierungsmittel und Ammoniumsalze als brandhemmende Stoffe mit einstelligen Prozentanteilen an der Trockenmasse. Darüber hinaus können Holzschutzmittel mit fungizider und insektizider Wirkung enthalten sein. Weitere **Hilfsstoffe** kommen im Nassverfahren zur chemischen Behandlung des Prozesswassers und als Trennmittel auf den Sieb- und Transportbändern auch im Trockenverfahren zum Einsatz. (Brombacher 2015)

Als Klebstoffe werden im Trockenverfahren zur Herstellung druckfester Holzfaserdämmstoffplatten Polyurethane auf Basis von Diphenyl-methan-diisocyanat (**MDI**) mit Aushärtungseigenschaften bei niedrigen Temperaturen ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) eingesetzt. Holzfaserdämmstoffplatten aus dem Nassverfahren können mit einem geringen Anteil an Phenolharzen gebunden sein. Bei den flexiblen Holzfaserdämmstoffmatten kommen thermoplastische Zweikomponenten-Kunstfasern (**Bikofasern**) zum Einsatz (Barth et al. 2018). Das Polymer des Mantels hat einen niedrigeren Schmelzpunkt ($< 130\text{ }^{\circ}\text{C}$) als das Polymer des Kerns ($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zur Bindung der Faserstoffe wird der Mantel geschmolzen. Die Kernfaser sorgt durch ihre Stützfunktion dafür, dass die geringe Rohdichte der Matte erhalten bleibt. Im Fall von Buchen-Faserstoffen zeigte Barth (2017), dass die Auswahl der Bikofasern entscheidend für vergleichbare mechanische Eigenschaften zu aus Fichten-Faserstoffen hergestellten Dämmstoffmatten ist. Der Anteil an der Trockenmasse konnte durch prozesstechnische Verbesserungen und Optimierung der Bikofasern mittlerweile von 6 % bis 8 % auf 2 % bis 3 % gesenkt werden.

5.2 Spezielle Prozesstechnik

Neben der bereits in Abschnitt 3.3.3 besprochenen Faserstofferzeugung sind das Nass- und das Trockenverfahren spezifisch in der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen. Für beide Verfahren werden die Faserstoffe im TMP-Verfahren erzeugt. Im **Nassverfahren** kann zusätzlich eine LC-Mahlung zur Anwendung kommen, um die Bindungskräfte zwischen den Holzfasern durch Fibrillierung zu erhöhen. Die Stoffsuspension wird anschließend auf einer Langsiebmaschine, ähnlich wie in der Papierherstellung, zu einem Faservlies geformt (Lampert 1967). Die Rohdichte der damit hergestellten Dämmstoffplatten liegt zwischen 100 kg/m^3 und 300 kg/m^3 bei einer maximalen Dicke von 20 mm. Die Dicke ist durch die notwendige Trocknung der Platten begrenzt. Höhere Dämmstoffdicken werden durch Verleimen mehrerer Schichten erzielt.

Mit der Übertragung des **Trockenverfahrens** aus der MDF-Herstellung wurde es möglich, Holzfaserdämmstoffplatten kontinuierlich bis zu einer Dicke von 300 mm sowie flexible Holzfaserdämmstoffmatten herzustellen (Antrag auf Nichtnennung 1998). Die Faservliesbildung erfolgt mittels mechanischer MDF-Streuköpfe oder adaptierten aerodynamisch-mechanischen Vliesbildnern aus der Textilherstellung. Im Gegensatz zur MDF-Herstellung kommt zur Aushärtung der Dämmstoffe Dampf- und/oder Heißluft zur Anwendung. Dadurch kann das poröse Faservlies mit geringer Dichte schnell auf die notwendige Temperatur gebracht werden. Der Pressdruck und die zur Aushärtung notwendige Temperatur sind vergleichsweise niedrig. Kawasaki et al. (1998) bestätigten die Praktikabilität dieser Technologie.

5.3 Aspekte der Wärmeleitfähigkeit

In Ergänzung zu Abschnitt 2.3.3 sollen hier produktspezifische Aspekte der Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen angesprochen werden. Im Zusammenhang mit den Produkteigenschaften von Holzfaserdämmstoffen wird weitgehend nicht auf die Normierung eingegangen, denn diese bildet nicht den Stand der Wissenschaft und Technik ab. Einen Überblick über die harmonisierten europäischen Dämmstoffnormen bietet Albrecht (2010). Moderne Holzfaserdämmstoffe werden als Platten, Matten und Einblasdämmung angeboten. Die Rohdichte liegt bei den druckfesten Dämmplatten typischerweise zwischen 120 kg/m^3 und 200 kg/m^3 sowie bei den flexiblen Dämmmatten zwischen 50 kg/m^3 und 60 kg/m^3 . Die Wärmeleitfähigkeit λ von Holzfaserdämmstoffen wird in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ angegeben. Hierbei ist zwischen Mess-, Nenn- und Bemessungswerten zu unterscheiden. Die Holzwerkstoffhersteller sind verpflichtet, den **Nennwert** λ_D der Wärmeleitfähigkeit anzugeben (EU 2011). Der Nennwert basiert auf $\lambda_{90/90}$ -Werten: Das heißt, dass 90 % der Messwerte mit 90 %-iger Wahrscheinlichkeit kleiner oder gleich dem Nennwert sind. Der weiterhin angegebene **Bemessungswert** enthält einen Sicherheitszuschlag für die statistische $\lambda_{90/90}$ -Unsicherheit ($\lambda_D + 20 \%$) oder mit technischer Spezifikation ($\lambda_{\text{grenz}} + 5 \%$) (DIN V 4108-4:2004-07 2004). In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Auswertung ausschließlich an Messwerten der Wärmeleitfähigkeit mit der europäisch einheitlich geregelten **Bezugsfeuchte** von $23^\circ\text{C} / 50 \%$ relativer Luftfeuchte (siehe Abschnitt 6.4.8). Moderne Holzfaserdämmstoffe weisen Nennwerte von minimal $0,036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei flexiblen Dämmmatten mit einer Rohdichte von 60 kg/m^3 bis hin zu $0,048 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei einer Rohdichte von 270 kg/m^3 auf.

Einflussfaktoren auf die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen wurden eingehend wissenschaftlich untersucht. Bezüglich der Beschaffenheit der Faserstoffe sind Untersuchungen von Scheiding (2000), F. Michel et al. (2014) und Makas (2016) zu erwähnen, die sich mit der Wärmeleitfähigkeit von **Siebfraktionen** beschäftigen. Scheiding (2000) zeigte an Fichten-Faserstoff,

dass die mit einem Schwingsieb erzeugte Feinfraktion (Durchgang Siebmaschenweite 0,355 mm) eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit aufweist, als der unklassierte Faserstoff. Die Grobfraktion (Rückstand Siebmaschenweite 4,0 mm) wies eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf. F. Michel et al. (2014) klassierte u.a. Buchen- und Fichten-Faserstoffe in eine feine (Siebmaschenweite 0,5 mm bis 4,0 mm) und eine grobe Sieblinie (Siebmaschenweite 4,0 mm bis 16 mm). Die feine Sieblinie wies bei beiden Holzarten die niedrigste Wärmeleitfähigkeit auf (Abbildung 5.1). Im Gegensatz zu Scheiding (2000) lag auch die grobe Sieblinie niedriger als der unklassierte Faserstoff. Diese Feststellung bestätigt Brombacher (2015, S. 111) für die industriellen Faserstoffe aus Buche, Fichte und Kiefer. Die Angabe der Siebmethode fehlt allerdings. Bei Makas (2016) hingegen weist der unklassierte Faserstoff die niedrigste Wärmeleitfähigkeit auf, gefolgt von der Fein-, Mittel- und Grobfraktion. Angaben zur Holzart, Siebmaschenweite oder Siebmethode sind jedoch nicht genannt.

Abbildung 5.1: Einfluss der Klassierung von Faserstoffen auf die Wärmeleitfähigkeit bei einer Rohdichte von 80 kg/m^3 . (F. Michel et al. 2014).

Eine weitere Einflussgröße auf die Wärmeleitfähigkeit stellt die **Rohdichte** dar. Vogel (1999) zufolge liegt das Minimum der Wärmeleitfähigkeit für TMP-Faserstoff bei rund $54 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$. Brombacher et al. (2012) wiesen einen linearen Zusammenhang ($R^2=0,87$) zwischen der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen unabhängig von deren Zusammensetzung oder dem Herstellungsprozess nach. Weiterhin scheint Brombacher et al. (2016) zufolge eine Korrelation ($R^2=0,68$) zwischen der Schüttrohdichte und der Wärmeleitfähigkeit von Fichten-Faserstoffen vorzuliegen. Vignon et al. (2016) schlagen anhand ihrer Erkenntnisse zum übergeordneten Einfluss der Rohdichte ein mathematisches Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte vor. Die Ergebnisse stimmen weitgehend mit Makas (2016) überein, der ein Minimum der Wärmeleitfähigkeit zwischen 45 kg/m^3 und 65 kg/m^3 verortet. Untersuchungen von Heinrich (2004) zum Einfluss der Rohdichte von Buchen-Faserstoffen gehen nicht über $33 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ hinaus. Brombacher (2015, S. 111) stellte keine Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von industriellem Buchen-Faserstoff bei einer Rohdichte zwischen rund 80 kg/m^3 und 110 kg/m^3 fest.

Neben der Beschaffenheit der Faserstoffe und der Rohdichte muss auf die **Holzfeuchte** als Einflussgröße auf die Wärmeleitfähigkeit eingegangen werden. Heinrich (2004) gibt an, dass der Einfluss der Holzfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit von Faserstoffen gering ist und praktisch keine Unterschiede zwischen Normklima und absolut trockenen Probekörpern festzustellen sind.

Die umfangreicheren Untersuchungen durch Sonderegger & Niemz (2012) belegen allerdings einen linearen Zusammenhang der Holzfeuchte im Bereich von 0 % bis 14 % bei einer Probenmitteltemperatur von 10 °C ($R^2=0,91$), 20 °C ($R^2=0,94$) und 30 °C ($R^2=0,96$). Weiterhin postulieren Ormondroyd et al. (2017) in diesem Zusammenhang eine abnehmende Ausgleichsfeuchte mit steigender Aufschluss temperatur anhand einer Faserstoff-Mischung aus Fichte, Kiefer und Tanne.

6 Material und Methoden

6.1 Material

6.1.1 Beschreibung des Ausgangsmaterials

Die Untersuchungen wurden an nicht pathologischem **Fichtenholz** (*Picea abies* Karst.) und **Buchenholz** (*Fagus sylvatica* L.) aus dem Panger Forst der Bayerischen Staatsforsten (Landkreis Rosenheim, Bayern, 47°49'17.5" N 12°02'07.4" O) durchgeführt. Der Standort liegt auf einer Höhe von ca. 480 m und ist geprägt von Hochmoortorf und Moränenmaterial. Das Alter der Bäume lag zwischen minimal ca. 35 Jahren und maximal ca. 67 Jahren. Von den fröhsummerlich frisch eingeschlagenen Stämmen wurde der Erd- und Mittelstamm verwendet und manuell entrindet. Für die **Hackschnitzelherstellung** wurde ein Trommelhacker vom Typ DH 120x400 L-2WV mit Vibrationsförderrinne CV 400N (BRUKS Klöckner GmbH, Hirtscheid, Deutschland) verwendet. Die Hackmesser wurden vor den Untersuchungen geschliffen und mit einer Einstelllehre eingestellt, um eine einwandfreie Hackqualität zu gewährleisten. Die fixen Prozessparameter des Trommelhackers sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die Konfiguration des Trommelhackers folgte der Anforderung an die nominelle Hacklänge nach Formel von BRUKS Klöckner GmbH (BRUKS Klöckner GmbH 02.10.2015). Die Lagerdauer der Hackschnitzel zwischen Erzeugung und Zerkleinerung war kürzer als sieben Tage (Arbeitsgruppe Sägenebenprodukte (AG SNP) im Ausschuss Forst und Holz 2000).

Tabelle 6.1: Prozessparameter des Trommelhackers BRUKS Klöckner DH 120x400 L-2WV (BRUKS Klöckner GmbH 2015).

Vorschubgeschwindigkeit	27 m/min
Rotordurchmesser	450 mm
Rotordrehzahl	817 min ⁻¹
Hackmesseranzahl	2
Sieblochung	35 mm x 45, mm
Nominelle Hacklänge	16,5 mm

Anschließend an die Hackschnitzelerzeugung erfolgte eine **Sortierung** mit einem Trommelsieb. Dabei wurde Feingut (Durchgang durch ein Sieb mit 3 mm Maschenweite) sowie Grobgut (Rückstand auf einem Sieb mit 20 mm Maschenweite) abgeschieden.

6.1.2 Industrielle Zellstoffe, Holzstoffe und Holzfaserdämmstoffe

Für vergleichende Untersuchungen zur Faserstoffherzeugung, zur Beschaffenheit der Faserstoffe, zur Wärmeleitfähigkeit wurden folgende Proben aus der industriellen Produktion beschafft:

- Northern bleached softwood kraft (NBSK), Holzart: Fichte, Hersteller: Zellstoff- und Papierfabrik Rosenthal GmbH.

- Magnesiumbisulfit-Aufschluss, Nachsortierung, Holzart: Buche 35 %, Fichte 65 %, Hersteller: Sappi Ehingen GmbH.
- Bleached chemi-thermomechanical pulp (BCTMP), Holzart: Fichte, Hersteller: West Fraser Mills Ltd..
- Holzschliff, ungebleicht, Holzart: Fichte, Hersteller: Kabel Premium Pulp & Paper GmbH.
- Thermomechanical pulp (TMP), 1. Refinerstufe, Low Retention, High Temperature and High Speed Verfahren (RTS™, Andritz AG) , Holzart: Fichte, Hersteller: UPM GmbH.
- MDF-Faser, Holzart: Kiefer, Hersteller: Kronospan GmbH.
- HDF-Faser, Holzart: Kiefer, Hersteller: IKEA Industry Poland.
- Zellulosedämmung: Altpapier, Hersteller: Peter Seppel Gesellschaft m.b.H..
- Holzfaserdämmstoff-Faser 1, Holzart: Fichte, Hersteller: Holzwerk Gebr. Schneider GmbH.
- Holzfaserdämmstoff-Faser 2, Holzart: Fichte, Hersteller: GUTEX Holzfaserplattenwerk H. Henselmann GmbH & Co. KG.
- Holzfaserdämmstoff-Faser 3, Holzart: Kiefer, Hersteller: STEICO SE.
- Holzfaserdämmstoff-Faser 4, Holzart: Kiefer, Hersteller: HOMATHERM GmbH.
- Holzfaserdämmstoff-Matte 1, Holzart: Fichte, Hersteller: Holzwerk Gebr. Schneider GmbH.
- Holzfaserdämmstoff-Matte 2, Holzart: Kiefer, Hersteller: STEICO SE.

Der Magnesiumbisulfit-Aufschluss, der BCTMP-Stoff, der Holzschliff sowie der TMP-Stoff wurden entwässert zur Verfügung gestellt und ungetrocknet präpariert. NBSK wurde als geschnittenes Handmuster zur Verfügung gestellt. Die MDF- und HDF-Fasern sind beleimt und getrocknet aus einer laufenden Produktion entnommen worden. Die Holzfaserdämmstoff-Fasern 1 und 2 sind handelsübliche Einblasdämmung. Die Holzfaserdämmstoff-Fasern 3 und 4 stammen aus der Produktion unterschiedlicher Dämmstoffhersteller und enthalten produktspezifische Zusatzstoffe. Bei der Zellulosedämmung und den Holzfaserdämmstoff-Matten handelt es sich um handelsübliche Produkte diverser Dämmstoffhersteller. Die Materialien wurden von einem Baustoffhändler bezogen.

6.2 Faserstofferzeugung

6.2.1 Spezifikationen der Mahlscheiben

Die Untersuchungen fanden an **sechs unterschiedlichen Mahlscheibenmustern** statt. Die Spezifikationen sind in Tabelle 6.2 bis Tabelle 6.8 aufgeführt. Die Mahlscheibenmuster wurden im Rahmen der Dissertation in Zusammenarbeit mit der Andritz AG ausgewählt, entwickelt, konstruiert und gefertigt. Unter den untersuchten Mahlscheiben befinden sich ein bidirektionales Muster (Tabelle 6.2), zwei Spiralen (Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4), ein Muster, das dem Stand der Technik in der MDF-Herstellung entspricht (Tabelle 6.5), ein speziell für Holzfaserdämmstoffe

entwickeltes Muster (Tabelle 6.6 und Tabelle 6.7) und eine Neuentwicklung für das RMP-Verfahren (Tabelle 6.8).

Die Mahlscheiben sind als Ringe mit einem Durchmesser von 12" (305 mm) ausgeführt und verfügen über drei Befestigungspunkte. Vor den Untersuchungen wurden die Mahlscheiben im Laborrefiner mit der Nenndrehzahl und unter Zugabe von Verdünnungswasser plan geschliffen. Dadurch wird Planparallelität der Mahlscheibenoberflächen von Rotor und Stator und die damit zusammenhängende Genauigkeit in der Einstellung des Mahlspalts gewährleistet. Außerdem wurden die Mahlscheiben vor den Untersuchungen zwischen 20 und 50 Betriebsstunden in der **Faserstoffherzeugung** eingefahren. Zum einen wurde dadurch das Verhalten der Mahlscheibenmuster erprobt und zum anderen wurden den Kanten der Stege die anfängliche Schärfe genommen.

Tabelle 6.2: Ausgewählte Spezifikationen des Mahlscheibenmusters 1. Andritz AG, Graz, Österreich.

Mahlscheibenmuster: 1 (12XA001)

Mahlbahn	Steganzahl	Stegwinkel	Stegbreite	Steghöhe	Nutbreite	Dammhöhe
Vorbrecher	12	0 °	6...5 mm	9...5 mm	n.a.	n.a.
Zone 1	70	-15...+15 °	3 mm	5 mm	4 mm	2 mm
Zone 2	158	-15 °...+15 °	2 mm	4 mm	3 mm	2...4 mm

Tabelle 6.3: Ausgewählte Spezifikationen des Mahlscheibenmusters 2. Andritz AG, Graz, Österreich.

Mahlscheibenmuster: 2 (12XA802)

Mahlbahn	Steganzahl	Stegwinkel	Stegbreite	Steghöhe	Nutbreite	Dammhöhe
Vorbrecher	17	30 °	7 mm	5...3 mm	n.a.	n.a.
Zone 1	68	25 °	4 mm	5 mm	4...8 mm	n.a.
Zone 2	136	20 °	2 mm	4 mm	3...4 mm	4 mm

Tabelle 6.4: Ausgewählte Spezifikationen des Mahlscheibenmusters 3. Andritz AG, Graz, Österreich.

Mahlscheibenmuster: 3 (12XA803)

Mahlbahn	Steganzahl	Stegwinkel	Stegbreite	Steghöhe	Nutbreite	Dammhöhe
Vorbrecher	18	30 °	5...10 mm	4,5...5,5 mm	n.a.	n.a.
Zone 1	72	30 °	3 mm	6 mm	3...4 mm	n.a.
Zone 2	108	36 °	2,5 mm	5 mm	2,5...3,5 mm	n.a.
Zone 3	144	44 °	2 mm	4 mm	2,5...3 mm	4 mm

Tabelle 6.5: Ausgewählte Spezifikationen des Mahlscheibenmusters 4. Andritz AG, Graz, Österreich.

Mahlscheibenmuster: 4 (12XAQM01)

Mahlbahn	Steganzahl	Stegwinkel	Stegbreite	Steghöhe	Nutbreite	Dammhöhe
Vorbrecher	12	30 °	6...4 mm	5...2 mm	n.a.	n.a.
Zentrum	72	...	3 mm	4 mm	4...6 mm	2 mm
Peripherie	144	25 °	2 mm	4 mm	3 mm	4 mm

Tabelle 6.6: Ausgewählte Spezifikationen des Rotors des Mahlscheibenmusters 5. Andritz AG, Graz, Österreich.

Mahlscheibenmuster: 5 (12XASR01R)

Mahlbahn	Steganzahl	Stegwinkel	Stegbreite	Steghöhe	Nutbreite	Dammhöhe
Vorbrecher	12	40 °	6...5 mm	7...4 mm	n.a.	n.a.
Zentrum	72	...	3 mm	4 mm	4...5 mm	2 mm
Peripherie	192	-25 °	2 mm	4 mm	2 mm	4 mm

Tabelle 6.7: Ausgewählte Spezifikationen des Stators des Mahlscheibenmusters 5. Andritz AG, Graz, Österreich.

Tabelle 6.8: Ausgewählte Spezifikationen des Mahlscheibenmusters 6. Andritz AG, Graz, Österreich.

6.2.2 Konfiguration der Laborrefineranlage im TMP-Verfahren

Die thermomechanischen Aufschlussversuche fanden im Labor für Holzwerkstofftechnik an der Technischen Hochschule Rosenheim statt. Zum Einsatz kam eine diskontinuierliche 12-1CP Einscheiben-Druckzerfaserungsanlage (Laborrefineranlage) (Andritz AG, Graz, Österreich). Die

Laborrefineranlage wurde im Jahr 2015 beschafft und vom Verfasser der Dissertation in Betrieb genommen. In Abbildung 6.1 ist die Konfiguration der Anlage im TMP-Verfahren dargestellt. Es kam keine Stopfschnecke oder anderweitige mechanische Vorbehandlung der Hackschnitzel zum Einsatz. Die variablen und fixen Prozessparameter der Laborrefineranlage für das TMP-Verfahren sind in Tabelle 6.9 aufgelistet.

Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der Konfiguration der Laborrefineranlage für die Faserstoffherzeugung im TMP-Verfahren. Eigene Darstellung.

Vor der Versuchsdurchführung wurden Druckbehälter (Kocher), Refinergehäuse und angrenzende Baugruppen unter Sattedampfdruck auf Betriebstemperatur gebracht. Anschließend wurden die Hackschnitzel über den Schnellverschluss in den Druckbehälter eingefüllt. Die Zerkleinerung erfolgte **diskontinuierlich** (Batch-Verfahren). Der Mahlpalt wurde manuell über ein Handrad mit Ringskala eingestellt. Die Skalenteilung betrug 0,05 mm der Mahlpaltverstellung. Vor der Einstellung wurde der Kontakt der Mahlscheiben als Nullpunkt festgelegt. Die Einstellung erfolgte stets unter Zustellung, um die unkontrollierte Öffnung des Mahlpalts durch Gewindenspiel zu unterbinden. Der Faseraustrag erfolgte durch den tangentialen Faserauslass über die Blasleitung (blowline) in einen Zyklon (nicht dargestellt). Unterhalb des Zyklons wurden die Fasern in Behältern aufgefangen. Die **Faserproben** wurden nach dem Einstellen konstanter Prozessbedingungen entnommen und anschließend in einem Trockenschrank in Abhängigkeit von der Beladung für bis zu 24 h bei 103 °C auf eine Feuchte von 5 % bis 8 % getrocknet.

Tabelle 6.9: Prozessparameter der Laborrefineranlage für das TMP-Verfahren (Andritz AG 2015).

Variable Prozessparameter	
Sattdampfdruck	1...12 bar
Aufschlussstemperatur	120...188 °C
Füllmenge max.	70 l
Verweilzeit	0...180 min
Förderleistung Einspeiseschnecke	0...100 %
Öffnung Blasventil	0...90 °
Fixe Prozessparameter	
Antriebsleistung, nominell	54 kW
Drehzahl Refinerwelle	3000 min ⁻¹
Mahlscheibendurchmesser	12“ bzw. 305 mm

Den Sattdampf für den Aufschluss lieferte ein **Dampferzeuger** des Typs DG 200 inklusive Speisewasseraufbereitung (Jumag Dampferzeuger GmbH, Hirschberg an der Bergstraße, Deutschland). Die angewendeten Prozessparameter des Dampferzeugers sind in Tabelle 6.10 aufgeführt. Der alkalische pH-Wert durch Sulfitüberschuss im Speisewasser wird über die Dosierlösung eingestellt. Die Dosierung ist vom Hersteller des Dampferzeugers vorgegeben, um Korrosion im Dampfkessel vorzubeugen.

Tabelle 6.10: Prozessparameter des Dampferzeugers DG 200 (Jumag Dampferzeuger GmbH 2014).

Leistung Brenner (Erdgas)	120 kW
Dampfleistung max.	200 kg/h
Arbeitsdruck max.	13 bar
Dosierlösung für Speisewasser	BoilerDos NDF 85, nicht dampfflüchtig
Gesamthärte Speisewasser	< 0,1 °dH
pH-Wert Speisewasser	7,5...9,5
Sulfitüberschuss Speisewasser	> 10 mg/l

6.2.3 Konfiguration der Laborrefineranlage im RMP-Verfahren

Die Untersuchungen zur Faserstoffherzeugung im RMP-Verfahren fanden ebenfalls im Labor für Holzwerkstofftechnik an der Technischen Hochschule Rosenheim mit einer 12-1CP Laborrefineranlage (Andritz AG, Graz, Österreich) statt. In Abbildung 6.2 ist die Konfiguration der Anlage im RMP-Verfahren dargestellt. Es kam keine Stopfschnecke oder anderweitige mechanische Vorbehandlung der Hackschnitzel zum Einsatz. Relevante technische Daten sind Tabelle 6.11 zu entnehmen.

Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Konfiguration der Laborrefineranlage für das RMP-Verfahren.

Die Laborrefineranlage verfügt über Anschlüsse zur Erwärmung von Hackschnitzeln mit Satteldampf ohne Druck in der Einspeiseschnecke und im unteren Teil des Kochers. Die Hackschnitzel wurden von oben in den geöffneten Kocher eingefüllt. Die Faserstoffherzeugung erfolgte **kontinuierlich**. Der Mahlpalt wurde manuell über ein Handrad mit Skala eingestellt. Die Skalenteilung betrug 0,05 mm der Mahlpaltverstellung. Vor der Einstellung wurde der Kontakt der Mahlscheiben als Nullpunkt festgelegt. Die Einstellung des Mahlpalts erfolgte unter Zustellung, um die Öffnung des Mahlpalts durch das Gewindenspiel zu unterbinden. Der Faseraustrag erfolgte über ein Schurre an der Unterseite des offenen Refinergehäuses. Die **Faserproben** für die weiteren Untersuchungen wurden nach dem Einstellen konstanter Prozessbedingungen in Behältern aufgefangen und anschließend in einem Trockenschrank in Abhängigkeit der Beladung für bis zu 24 h bei 103 °C auf eine Feuchte von 5 % bis 8 % getrocknet.

Tabelle 6.11: Ausgewählte, relevante technische Daten der Konfiguration der Laborrefineranlage für das RMP-Verfahren (Andritz AG 2015).

Variable Prozessparameter	
Aufschluss Temperatur max.	100 °C
Förderleistung Einspeiseschnecke	0...100 %
Verweilzeit	0...180 min
Fixe Prozessparameter	
Atmosphärendruck Antriebsleistung, nominell	54 kW
Drehzahl Refinerwelle	3000 min ⁻¹
Mahlscheibendurchmesser	12“ bzw. 305 mm

6.2.4 Erfassung von Prozessparametern

Die Datenerfassung von technologischen Parametern der Laborrefineranlage erfolgte mittels **Trendanalyse** der Software SIMATIC STEP 7 (Siemens AG, München, Deutschland). Erfasst wurden:

- Der Dampfdruck im Kocher mit dem digitalen Drucktransmitter PMP51 (Endress+Hauser GmbH&Co. KG, Weil am Rhein, Deutschland).
- Die Temperatur im Kocher mittels Temperaturkopfttransmitter TMT181-A (Endress+Hauser GmbH&Co. KG, Weil am Rhein, Deutschland).
- Die Drehzahl der Einspeiseschnecke am Umrichter MICROMASTER 420 (Siemens AG, München, Deutschland).
- Der Mahlscheibenabstand durch den induktiven Analogsensor IA15-30GM-I3 (Pepperl+Fuchs GmbH, Mannheim, Deutschland), in Ergänzung zur Ringskala am Handrad der Mahlschneckenverstellung.
- Die Leistungsaufnahme des Refinermotors über den Stromtransformator MAK62/30 (Cewe Instrument AB, Nyköping, Schweden).

Die Rohdaten standen als *.csv-Datei zur Verfügung.

6.3 Vliesbildung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Vor der Vliesbildung wurden die getrockneten Faserstoffe *geflufft*, um Agglomerate, die während der Ofentrocknung entstanden sind, aufzulösen. Der **Fluffer** im Labor für Holzwerkstofftechnik an der Hochschule Rosenheim besteht aus einem Ventilator in einem Rohrsystem, indem das Faserstoff-Luft-Gemisch zirkuliert und durch die Rotorblätter des Ventilators vereinzelt wird. Über eine Weiche in dem Rohrsystem kann der Faserstoff über einen Zyklon aus dem Luftstrom abgeschieden und aufgefangen werden.

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe erfolgte anschließend eine **aerodynamische Vliesbildung** in einer, im Rahmen der Dissertation entwickelten, Vorrichtung nach Abbildung 6.3. Dazu wurden die Faserstoffe mit einer Venturidüse in den durch den Faserstreuung zirkulierenden Luftstrom eingesaugt. Über die Einblas-, Formierungs- und Vliesbildungszone

wurde ein gleichmäßiges Faservlies auf einer Fläche von maximal $0,7 \times 0,7 \text{ m}^2$ gestreut. Die Vlieshöhe betrug maximal 0,6 m. Umfangreiche Vorversuche bestätigten eine deutlich **homogene Dichteverteilung** über die Fläche der Vliese im Vergleich zu manuell gestreuten Vliesen. Die Reproduzierbarkeit wurde ebenfalls verbessert. Die Faservliesbildung erfolgte ohne Zusatz-, Hilfs- oder Klebstoffe.

Abbildung 6.3: Schematische Darstellung des Faserstreuturms im Querschnitt.

6.4 Analytische Methoden

6.4.1 Grundlegende Untersuchungen zur Prozessführung in der labortechnischen Faserstofferzeugung

Bestimmung der Partikelgröße von Hackschnitzeln

Die Struktur der Hackschnitzel wurde nach dem Prüfverfahren SCAN-CM 40:01 (SCAN-CM 40 2001) an lufttrockenen Hackschnitzeln durchgeführt. Die Prüfsiebung fand auf dem **Hackschnittzelsortierer** Typ S4019 (Frank-PTI GmbH, Birkenau, Deutschland) mit den Siebeinsätzen 45 mm Loch, 8 mm Spalt, 13 mm Loch, 7 mm Loch und 3 mm Loch statt. Die Probemenge umfasste 5 l. Die Siebzeit betrug 10 min. Die Bestimmung der Partikelgröße fand an drei zufällig ausgewählten Hackschnitzelproben mit Doppelbestimmung statt.

Bestimmung der Schüttdichte von Hackschnitzeln

Die Schüttdichte wurde an luftgetrockneten Hackschnitzeln volumetrisch bestimmt. Dazu wurden die Hackschnitzel in ein kubisches Gefäß von $0,4 \times 0,4 \times 0,4 \text{ m}^3$ geschüttet. Der Überstand wurde mit einer Holzplatte bündig zur Oberkante des Gefäßes entfernt. Anschließend wurde die atro-Masse der Hackschnitzel ermittelt (s. 6.4.2) und damit die Schüttdichte berechnet. Die Bestimmung erfolgte jeweils in dreifacher Wiederholung.

Effekte auf ausgewählte Zielgrößen der Laborrefineranlage

Zur Identifizierung von Prozessparametern (Faktoren), die einen entscheidenden Effekt auf die Zielgrößen in der labortechnischen Faserstofferzeugung haben, wurde ein **zweistufiges faktorielles Screening-Design** (Software R) angewendet (Box et al. 2005, S. 177; Grömping 2014). Unter allen möglichen einstellbaren Prozessparametern der Laborrefineranlage wurden quantitative und qualitative Faktoren ausgewählt, die unmittelbar vor, während und nach der Faserstofferzeugung in den Prozess integriert sind. Ein weiteres Auswahlkriterium war, dass die Faktoren in zwei Stufen regel- und kombinierbar sind (Grömping & J. Fox 2015, S. 16).

Zur Untersuchung grundlegender Effekte auf die Zielgröße Durchsatz wurden die Stufen aus Tabelle 6.12 verwendet. Für die **Ermittlung des Durchsatzes** der Refineranlage kamen die Pro-

Tabelle 6.12: Stufen der Prozessparameter (Faktoren) für ein zweistufiges faktorielles Screening-Design zur Untersuchung grundlegender Effekte auf die Zielgröße Durchsatz.

Prozessparameter	Einheit	Stufe -1	Stufe 1
Holzart		Buche	Fichte
Sattdampfdruck (Temperatur)	bar	4 (150 °C)	8 (175 °C)
Mahlscheibenmuster		12XA802	12XASR01

zessparameter aus Tabelle 6.13 zur Anwendung. Die Effekte auf die zwei Zielgrößen **spezifische**

Tabelle 6.13: Prozessparameter (Faktoren) zur Ermittlung des Durchsatzes der Laborrefineranlage.

Prozessparameter	Bedingung
Holzart	Buche und Fichte
Sattdampfdruck (Temperatur)	4 bar (150 °C)
Mahlscheibenmuster	12XASR01
Kocherfüllung	50 - 60 l
Kochzeit	3 min
Förderleistung Einspeiseschnecke	33 %, 66 %, 99 %

elektrische Leistungsaufnahme und **Holzfeuchte** der Fasern nach dem Aufschluss wurden anhand der Stufen in Tabelle 6.14 untersucht.

6.4.2 Bestimmung der Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattdampfatmosfera

Die Bestimmung der Holzfeuchte von Hackschnitzeln erfolgte durch Ofentrocknung in Aluminiumschalen mit einem Volumen von 1 l bei 103 °C in dem Trockenschrank UT20 (Heraeus

Tabelle 6.14: Stufen der Prozessparameter (Faktoren) für ein zweistufiges faktorielles Screening-Design zur Untersuchung grundlegender Effekte auf die zwei Zielgrößen spezifische elektrische Leistungsaufnahme und Holzfeuchte der Fasern nach dem Aufschluss.

Prozessparameter	Einheit	Stufe -1	Stufe 1
Holzart		Fichte	Fichte
Holzfeuchte der Hackschnitzel *	%	60	95
Kochzeit	min	1	10
Sattdampfdruck (Temperatur)	bar	3 (140 °C)	9 (180 °C)
Förderleistung Einspeiseschnecke	%	40	100
Mahlspalt	mm	0,1	0,6
Kocherfüllung	l	15	50
Öffnung Blasventil		a	u
Drehrichtung Agitator		rechts	links

* Bestimmung der Holzfeuchte n=6.

Instruments) bis zur Massenkonzanz nach Gleichung 6.1.

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \quad (6.1)$$

u Holzfeuchte in %

m_u Feuchte Masse der Hackschnitzel

m_0 Trockenmasse der Hackschnitzel

Zusätzlich wurde die aus der Papierherstellung bekannte Konsistenz nach Gleichung 6.2 berechnet.

$$k = \frac{m_0}{m_u} \cdot 100 \quad (6.2)$$

k Konsistenz in %

m_u Feuchte Masse der Hackschnitzel

m_0 Trockenmasse der Hackschnitzel

Die Bestimmung der Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattdampfatmosfera erfolgte *in situ* innerhalb des Druckbehälters der Laborrefineranlage. Die untersuchten Varianten sind in Tabelle 6.16 aufgelistet. Die *in situ* Methode wurde im Rahmen der Dissertation entwickelt. Der **Versuchsaufbau** ist in Abbildung 6.4 schematisch dargestellt. Die Massenermittlung erfolgte gravimetrisch mit einer mechanischen Waage aus Edelstahl (Artikel-Nr.: 30102, Gastrobäck GmbH, Hollenstedt, Deutschland). Zur Datenerfassung wurde die Skala der Waage mit einer Digitalkamera durch ein Schauglas in der Wandung des Druckbehälters aufgenommen. Die Auswertung erfolgte videotechnisch. Die Waage befand sich während der Versuchsdurchführung oberhalb der Dampfleitung in den Druckbehälter. Somit konnte ein Wassermittress aus dem Dampfkessel die Messung nicht beeinflussen. Außerdem wurde oberhalb der Waage ein Rundblech eingesetzt, um herabtropfendes Kondensat abzuleiten (Abbildung 6.4).

Zu Beginn der Untersuchungen wurden Nulltests mit dem Versuchsaufbau durchgeführt, um den Einfluss von Temperatur und Kondensat auf die Massenermittlung abzuschätzen. Aus den Nullmessungen (n=8) wurde für die **Korrektur der Prüfkörpermasse** unter Sattdampfdruck ein Wert von 20 g ermittelt. Dies ist auf Kondensatbildung an der Waagschale zurückzuführen. Die Prüfkörpermasse nach dem Druckabbau muss um 10 g korrigiert werden. Ein Einfluss der Temperatur auf die Massenermittlung war nicht messbar.

Abbildung 6.4: Schema des Versuchsaufbaus zur in situ Ermittlung der Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattedampf-atmosphäre. Abgebildet ist ein Schnitt durch den Druckbehälter der Laborrefineranlage.

Gegenstand der Untersuchungen waren unbehandelte Hackschnitzel aus Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Fichte (*Picea abies* Karst.) (Tabelle 6.15). Ein Teil der Fichtenholz-Hackschnitzel wurde für ca. 72 h wassergelagert, um die Wassersättigung zu erreichen. Vor den Untersuchungen wurden diese Hackschnitzel für ca. 6 h abgedeckt auf einem Sieb entwässert. Die Holzfeuchte lag im mittleren und nach Wasserlagerung im oberen Bereich der Wassersättigung. Die Anfangs-Temperatur der Hackschnitzel betrug ca. 20 °C. Die Hackschnitzel wurden zufällig einer der 10

Tabelle 6.15: Anfangs-Holzfeuchte der untersuchten Hackschnitzel.

Holzart	Holzfeuchte	
	$\bar{x}$ %	σ %
Buche	48	2
Fichte	76	3
Fichte, wassergelagert	135	8

Varianten aus Tabelle 6.16 zugeführt. Die Untersuchungen wurden je Holzart und Variante fünfmal unabhängig wiederholt.

Tabelle 6.16: Varianten und zugehörige Prozessparameter zur Bestimmung der Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattedampfatmosfera.

Variante	Bedingungen		Dauer
1	Sattedampf	1 bar (120 °C)	6 min
2	Sattedampf	2 bar (133 °C)	6 min
3	Sattedampf	3 bar (143 °C)	6 min
4	Sattedampf	4 bar (151 °C)	6 min
5	Sattedampf	5 bar (158 °C)	6 min
6	Sattedampf	6 bar (165 °C)	6 min
7	Sattedampf	7 bar (170 °C)	6 min
8	Sattedampf	8 bar (175 °C)	6 min
9	Sattedampf	9 bar (179 °C)	6 min
10	Sattedampf	0 bar (100 °C)	*

* Ventil öffnen und Druckabbau abwarten.

6.4.3 Bestimmung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in der Faserstoffherzeugung

Die Berechnung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme erfolgt aus der Leistungsaufnahme des Refineramotors nach Gleichung 3.2 in 3.4.2. Im **TMP-Verfahren** wurden die Varianten der Faserstoffe aus Tabelle 6.18 in vier randomisierten Wiederholungen erzeugt. Die Holzfeuchte der Fichtenholz-Hackschnitzel lag zwischen 109 % und 136 %, die der Buchenholz-Hackschnitzel zwischen 61 % und 82 % (n=6).

Im **RMP-Verfahren** wurden die Varianten der Faserstoffe aus Tabelle 6.17 in vier randomisierten Wiederholungen erzeugt. Die Versuche wurden in zwei Temperaturstufen unter Atmosphärendruck durchgeführt. In der Temperaturstufe 20 °C wurden die Hackschnitzel ohne zusätzliche Erwärmung der Zerkleinerung zugeführt. Für die Erwärmung der Hackschnitzel auf 100 °C wurde Sattedampf von unten in die Hackschnitzel eingeleitet (vgl. Abschnitt 6.2.3).

Tabelle 6.17: Prozessparameter zu den Varianten in der Faserstoffherzeugung im **RMP-Verfahren**.

Variante	Mahlscheibe	Holzart	Aufschlussbedingungen	Verweilzeit	Mahlspalt
1	6	Fichte	Atmosphärendruck: 20 °C	n.a.	0,15 mm
2	6	Fichte	Atmosphärendruck: 100 °C **	3 min	0,15 mm
3	6	Buche	Atmosphärendruck: 20 °C	n.a.	0,15 mm
4	6	Buche	Atmosphärendruck: 100 °C **	3 min	0,15 mm

* Manuelle Einstellung an der Ringskala der Laborrefineranlage.

** Die Erwärmung erfolgte mit Sattedampf unter Atmosphärendruck.

Tabelle 6.18: Prozessparameter zu den Varianten in der Faserstoffherzeugung im **TMP-Verfahren**.

Variante	Mahlscheibe	Holzart	Aufschlussbedingungen	Verweilzeit	Mahlspalt *
1	1	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
2	1	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
3	1	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm
4	1	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
5	1	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
6	1	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm
7	2	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
8	2	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
9	2	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm
10	2	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
11	2	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
12	2	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm
13	3	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
14	3	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
15	3	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm
16	3	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
17	3	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
18	3	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm
19	4	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
20	4	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
21	4	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm
22	4	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
23	4	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
24	4	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm
25	5	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
26	5	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
27	5	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm
28	5	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	3 min	0,15 mm
29	5	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	3 min	0,15 mm
30	5	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	3 min	0,15 mm

* Manuelle Einstellung an der Ringskala der Mahlspaltverstellung.

6.4.4 Bestimmung der Feuchte und Konsistenz von Faserstoffen

Zur Bestimmung der Feuchte und Konsistenz von Faserstoffen nach dem Aufschluss wurden die Faserstoffe am Auslass des Zyklons in Aluminiumschalen mit einem Volumen von 1 l aufgefangen. Die Bestimmung erfolgte durch Ofentrocknung bei 103 °C in dem Trockenschrank UT20 (Heraeus Instruments) bis zur Massenkonstanz an drei Proben je Variante (Tabelle 6.18 und Tabelle 6.17). Die Berechnung der Feuchte und Konsistenz erfolgte analog zu den Gleichung 6.1 und Gleichung 6.2 aus Abschnitt 6.4.2.

6.4.5 Bestimmung der Dispersitätseigenschaften von Faserstoffen mit der Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung

Die Charakterisierung von Dispersitätseigenschaften am **Partikelkollektiv** erfolgte durch Luftstrahl-Prüfsiebung der luftgetrockneten Holzstoffe. Zum Einsatz kam das Luftstrahlsieb e200LS (Hosokawa Alpine AG, Augsburg) gemeinsam mit dem Messaufnehmer Waage PB602-S (Mettler Toledo, Gießen).

Es wurden alle Wiederholungen der Faserstoffvarianten aus Tabelle 6.18 und Tabelle 6.17 in Doppelbestimmungen untersucht. Die **Probennahme** erfolgte manuell aus den getrockneten und *geflufften* Faserstoffen. Die Probengröße einer Einzelprobe betrug in Anlehnung an DIN 51701 mindestens 0,25 kg, um eine hohe Präzision zu gewährleisten. Die Probenteilung erfolgte manuell in Analyseproben von 5 g. Die Prüfsiebung erfolgte einzeln an sechs Prüfsieben (50 x 200mm) (Haver and Boecker OHG, Oelde) mit den Maschenweiten 125, 315, 600, 1000, 1600 und 2500 µm. Die Prüfsiebung wurde im Standard-Verfahren durchgeführt (Wägung des Siebrückstandes, beginnend mit der kleinsten Maschenweite). Die siebrelevanten Parameter waren durch den Laborstandard in Anlehnung an EN ISO 4610:2001 (2002) vorgegeben. Die Bestimmung der Dispersitätseigenschaften erfolgte in Doppelbestimmung.

Abbildung 6.5: Die normierte Verteilungssumme $Q_r(x)$ erstreckt sich zwischen 0 % und 100 %. Jeder Punkt der Verteilung $Q_r(x)$ gibt die relative Menge von Partikeln kleiner oder gleich x_i an (DIN ISO 9276-1:2004-09 2004).

Die Ermittlung der Siebkennlinie erfolgte mit der Methode „Durchgang“ in Bezug auf die Einwaage nach DIN ISO 9276-1:2004-09 (2004) & DIN ISO 9276-2:2018-09 (2018) (Abbildung 6.5). Daraus folgt eine massenbezogene Gewichtung der **Verteilungssumme Q_r** mit der Mengenart Masse ($r=3$). Die Verbindung der einzelnen Punkte erfolgte in erster Annäherung mit Geraden. Die Darstellung von Q_3 als relative Summenhäufigkeit ermöglichte die Berechnung von Kennwerten der Partikelgrößenverteilung. Als repräsentative Größe der Faserstoffe wurde der Medianwert $x_{50,3}$ aus der Verteilungssumme nach Abschnitt 10.1 berechnet (Bohnet 2004, S. 29). Ein weiteres Charakteristikum ist das 97 %-Perzentil der Verteilungssumme, welches zur Berechnung der mittlere Partikelausdehnung (Gleichung 6.3) dient und analog zum Medianwert berechnet wurde. Dieser Feinheitkennwert gibt nach Jensen (1975) Auskunft über die Homogenität des Faserstoffes und wird im vorliegenden Fall auf das obere Feinheitintervall angewendet. Alle Kennwerte nach der Luftstrahl-Prüfsiebung charakterisieren die Partikelgrößenverteilung des Faserstoffes als

Prüfsiebmaschenweite.

$$\Delta x_3 = x_{97,3} - x_{50,3} \quad (6.3)$$

Δx_3	Mittlere Partikelausdehnung in μm
$x_{97,3}$	Partikelgröße des 97 %-Perzentils der Verteilungssumme
$x_{50,3}$	Partikelgröße des Medianwerts der Verteilungssumme

6.4.6 Bestimmung der Dispersitätseigenschaften von Faserstoffen mit der Individualmethode quantitative Bildanalyse

Für die statische, quantitative Bildanalyse kam die Software FibreShape Version 6.2.0 (Innovative Sensor Technology IST AG, Ebnet-Kappel, Schweiz) zum Einsatz. Die Aufnahmen der Faserstoffe wurden mit dem Scanner Perfection V800 (SEIKO Epson CORPORATION, Japan) und der Software Silverfast Ai Studio 8 (LaserSoft Imaging AG, Kiel, Deutschland) erzeugt. Die **Auflösung** wurde auf 2400 dpi eingestellt, wodurch die tatsächliche maximale Auflösung des Scanners nahezu ausgenutzt werden konnte (Schlüter 2017). Die Kantenlänge eines Pixels betrug in dieser Auflösung 10,58 μm . Die Bildfläche einer Aufnahme maß 12 x 16 cm^2 , was der Begrenzung der Dateigröße der FibreShape Software auf 170 MB geschuldet war.

Es wurden alle Wiederholungen der Faserstoffvarianten aus Tabelle 6.18 und Tabelle 6.17 in Doppelbestimmungen untersucht. Die **Probennahme** erfolgte manuell aus den getrockneten und *geflufften* Faserstoffen. Die Probengröße einer Einzelprobe betrug in Anlehnung an DIN 51701 mindestens 0,25 kg, um eine hohe Präzision zu gewährleisten. Die Probenteilung erfolgte manuell in Analyseproben von 0,05 g. Die Analyseproben wurden auf drei Glasplatten (3 mm x 200 mm x 300 mm) mit Prüfsieben (50 x 200 mm) (Haver and Boecker OHG, Oelde) aufsteigend mit den Siebmaschenweiten 125 μm , 315 μm und 630 μm vereinzelt, um einen Bildflächenanteil unterhalb des Limits von 3 % sicherzustellen. Die Bildanalyse erfolgte mit der Parameterauswahl in Abbildung 6.6. Zusätzlich wurde in der Software FibreShape die Schattenkorrektur angewendet und ein Schwellwert von 230 manuell ausgewählt.

Die **Darstellung** der Dispersitätseigenschaften basierte auf den Normen DIN ISO 9276-1:2004-09 (2004), DIN ISO 9276-2:2018-09 (2018) und DIN ISO 9276-6:2012-01 (2012). Die geodätische Länge und geodätische Breite der Fasern wurde mit dem Rechteck-Model (rectangle model) nach Schmid et al. (2020) berechnet. Die Darstellung der Verteilungssumme Q_r wurde nach Gleichung 6.4 flächenbezogen ($r=2$) gewichtet. Für die Gewichtung kam die gefüllte Fläche des Partikel (AREAF) nach Schmid et al. (2020) zur Anwendung, die durch die Software FibreShape automatisch ermittelt wurde. Die Funktion ist auf weitere Gewichtungen nach Länge, Dicke etc. anwendbar.

$$y_A = \frac{x_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (6.4)$$

y_A	Flächenbezogene Gewichtungsfunktion
x_i	Partikel-Formdeskriptor (Länge, Dicke etc.)
A_i	Partikelfläche
n	Anzahl Partikel

Aus den Rohdaten der Bildanalyse wurden die Partikel anhand von Primär- und Sekundärkriterien in Anlehnung an Wenderdel et al. (2014), Karnis (1994) und Forgacs (1963) in **Partikelklassen** eingeteilt (Tabellen 6.19 und 6.20). Die Sekundärkriterien für die zweidimensionalen Formdeskriptoren geodätische Länge und geodätische Dicke wurden Tabelle 2.1 entnommen. Das Kriterium der Elongation nach Gleichung 6.5 wurde zur Unterscheidung von faserartigen und kornförmigen

Partikeln auf den Wert 0,3 festgelegt. Die Kriterien wurden so gewählt, dass die Flächenanteile der einzelnen Klassen in Summe der Gesamtfläche entsprechen.

$$E = \frac{x_E}{x_{LG}} \quad (6.5)$$

E Elongation
 x_E Geodätische Dicke
 x_{LG} Geodätische Länge

a

Parameter	Value
Density [g/cm3]	0.0
Fill holes	TRUE
Kind of material	fibre
Knot punch out	FALSE
Max. pixel size[um]	1000.0
Size model	rectangle
Transparent objects	FALSE
Zoom factor	0.71

b

Parameter	Minimum	Maximum
1/Convexity	0.0	1.5
1/Elongation	0.0	100000.0
Angle	0.0	180.0
Aspect ratio	0.0	1.0
Geodesic length	10.0	100000.0
Solidity	0.0	1.0
Thickness	10.0	10000.0
Thickness [pix]	2	100000

Parameter	Value
Closing count	0
Measure object with holes	True

Abbildung 6.6: Relevante Parameter der Messmaske Software FibreShape für die quantitative Bildanalyse der Faserstoffe. **a**, Algorithmus-Parameter. **b**, Parameter des morphologischen Filters gemäß DIN ISO 9276-6:2012-01 (2012) & DIN ISO 9276-1:2004-09 (2004) Namenskonvention.

Tabelle 6.19: Klassifizierung von Partikeln aus **Fichtenholz**-Faserstoffen anhand zweidimensionaler Formdeskriptoren.

Partikelklasse	Partikelform	Primärkriterium	Sekundärkriterien	Beschreibung
Faserbündel (FB)	faserartig	$E \leq 0.3$	$x_E > 43 \mu\text{m}$	Faserbündel bestehen in der Dicke aus mind. 2 Zellen, Bruchstücke
Langfaser (LF)	faserartig	$E \leq 0.3$	$x_E \leq 43 \mu\text{m}$ $x_{LG} > 1700 \mu\text{m}$	Tracheiden
Kurzfaser (KF)	faserartig	$E \leq 0.3$	$x_E \leq 43 \mu\text{m}$ $x_{LG} \leq 1700 \mu\text{m}$	Bruchstücke von Tracheiden, Parenchym
Grobstoff (GS)	kornförmig	$E > 0.3$	$x_{Fmax} > 50 \mu\text{m}$	Bruchstücke von Faserbündeln
Feinstoff (FS)	kornförmig	$E > 0.3$	$x_{Fmax} \leq 50 \mu\text{m}$	Bruchstücke von Einzelfasern
DIN ISO 9276-6 Namenskonvention: E = Elongation, x_E = geodätische Dicke, x_{LG} = geodätische Länge, x_{Fmax} = maximaler Feret-Durchmesser				

Tabelle 6.20: Klassifizierung von Partikeln aus **Buchenholz**-Faserstoffen anhand zweidimensionaler Formdeskriptoren.

Partikelklasse	Partikelform	Primärkriterium	Sekundärkriterien	Beschreibung
Faserbündel (FB)	faserartig	$E \leq 0.3$	$x_E > 32 \mu\text{m}$	Faserbündel bestehen in der Dicke aus mind. 2 Zellen, Bruchstücke
Langfaser (LF)	faserartig	$E \leq 0.3$	$x_E \leq 32 \mu\text{m}$ $x_{LG} > 500 \mu\text{m}$	Fasertracheiden und Librifasern
Kurzfaser (KF)	faserartig	$E \leq 0.3$	$x_E \leq 32 \mu\text{m}$ $x_{LG} \leq 500 \mu\text{m}$	Bruchstücke von Fasertracheiden und Librifasern, Parenchym
Grobstoff (GS)	kornförmig	$E > 0.3$	$x_{Fmax} > 50 \mu\text{m}$	Bruchstücke von Faserbündeln, Tracheen
Feinstoff (FS)	kornförmig	$E > 0.3$	$x_{Fmax} \leq 50 \mu\text{m}$	Bruchstücke von Einzelfasern
DIN ISO 9276-6 Namenskonvention: E = Elongation, x_E = geodätische Dicke, x_{LG} = geodätische Länge, x_{Fmax} = maximaler Feret-Durchmesser				

Im Weiteren wurden nach Wenderdel (2015) & Krug (2010) (ursprünglich Jensen (1975)) die mittlere Partikelausdehnung (Gleichung 6.6) und das Partikelausdehnungsintervall (6.7) der Verteilungssumme definiert. Diese Kennwerte stellen ein Maß für die mittlere Ausdehnung einer logarithmisch aufgetragenen Verteilungssumme dar und geben durch die Breite des Ausdehnungsintervalls Auskunft über den Grad der Homogenität eines Partikel-Formdeskriptors.

$$mx_r = \frac{x_{16,r} + x_{50,r} + x_{84,r}}{3} \quad (6.6)$$

mx_r Mittlere Partikelausdehnung in μm
 $x_{16,r}$ Partikelgröße des 16 -% Perzentils der Verteilungssumme
 $x_{50,r}$ Partikelgröße des Medianwerts der Verteilungssumme
 $x_{84,r}$ Partikelgröße des 84 -% Perzentils der Verteilungssumme

$$\Delta x_r = x_{84,r} - x_{16,r} \quad (6.7)$$

Δx_r Partikelausdehnungsintervall in μm
 $x_{16,r}$ Partikelgröße des 16 -% Perzentils der Verteilungssumme
 $x_{84,r}$ Partikelgröße des 84 -% Perzentils der Verteilungssumme

6.4.7 Mikroskopische Untersuchungen an den Faserstoffen

Für die mikroskopischen Untersuchungen wurden Fasern (ca. 2 g) aus dem Spektrum der Holz- und Zellstoffe aus Abschnitt 6.1.2 und der Faserstoffvarianten aus Tabelle 6.18 und Tabelle 6.17 entnommen. Bei den Faserstoffvarianten wurden die Faserstoffe untersucht, mit denen eine Wärmeleitfähigkeitsmessung durchgeführt wurde. Es wurde darauf geachtet, die Dispersitätseigenschaften des Partikelkollektivs für die Mikroskopie zu erhalten. Um die chemischen Oberflächeneigenschaften, die Zugänglichkeit der inneren Struktur und den Grad der Fibrilierung der Fasern sichtbar zu machen, wurde eine zweifarbige **differentielle Färbemethode** nach Simon (1950) angewendet (Simons' stain). Das Färbungsmittel bestand aus 1 %-iger wässriger Lösung mit Chicago Sky Blue 6B (CAS: 2610-05-1, Fisher Scientific GmbH, Schwerte) und 1 %-iger wässriger Lösung mit Direct Yellow 11 (CAS: 1325-37-7, Merck KGaA, Darmstadt), die im Verhältnis 1:1 gemischt wurden. Die Färbungsmittel wurden nicht weiter vorbehandelt.

Die Faserpräparation erfolgte durch die Herstellung einer Faserstoff-Suspension mit einer Konsistenz von 0,05 % in demineralisiertem Wasser. Die Färbungsprozedur begann mit der Präparation der Fasern auf einem Objektträger nach T 401 om-03 (2008). Die fixierten Fasern wurden mit 1 ml bis 2 ml des Färbungsmittels getränkt und anschließend bei 60 °C ofengetrocknet. Es folgte eine gründliche Spülung mit demineralisiertem Wasser unter einem Deckglas und wiederholter Ofentrocknung bei 60 °C.

Für die mikroskopischen Aufnahmen wurde das Mikroskop BX61 mit der Durchlichteinheit BX-UCN und der Lichtquelle U-RFL-T sowie der Software Stream Motion (OLYMPUS EUROPA SE & CO. KG, Hamburg) verwendet. Folgende Einstellungen wurden am Mikroskop vorgenommen: Lampenintensität 6 V, Aperturblende 75 %, Objektivvergrößerung 4 x, Verstärkung (Weißabgleich) Rot: 1.49, Grün: 1.00, Blau: 2.23.

6.4.8 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Faserstoffen

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe wurde an der Technischen Hochschule Rosenheim im **Zweiplattenverfahren** durchgeführt. Zum Einsatz kam das Wärmeleitfähigkeit-Messgerät TLP 900 GX mit der Software Lambda V.2012 (TAURUS Instruments AG, Weimar) nach den Anforderungen der ISO 8302:1991 (1991). Das Gerät verfügt über eine Messkammerhaube mit Temperierung auf die Probenmitteltemperatur, um die Messung gegenüber Umwelteinflüssen und den Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft weitgehend zu schützen. Der Aufbau der Messplattenapparatur ist in Abbildung 6.7 schematisch dargestellt. Die Darstellung zeigt auch den typischen Probekörpereinbau für eine Zweiplatten-Messung. Im Falle der vorliegenden Arbeit konnte auf den Einsatz von Kontaktmatten verzichtet werden, da es sich bei den Faserstoffen um ein leicht zu komprimierendes Material handelt und dadurch der vollflächige Kontakt ohne Lufteinschlüsse zu Heiz- und Kühlplatten gewährleistet war.

Abbildung 6.7: Aufbau der Messplattenapparatur im Wärmeleitfähigkeits-Messgerät TLP 900 GX. (TAURUS Instruments AG 2018).

Der in der Messung erfasste **Wärmestrom** wird von der Heizplatte in der Mitte auf einer Fläche von $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$ erzeugt und fließt aufgrund einer definierten Temperaturdifferenz senkrecht durch die Probekörper zur oberen und unteren Kühlplatte. Die Messung der Temperaturdifferenz erfolgte durch fünf Thermoelemente auf Trägerfolien je Messebene (Heiz- und Kühlplatte). Durch einen Schutzheizring und eine zusätzliche Probenschutzdämmung wird der Wärmefluss an den Randzonen unterbunden. Die Konstruktion ist so ausgelegt, dass die zugeführte elektrische Leistung über die gesamte Messfläche homogen in Wärme umgewandelt wird. Den Leistungsangaben des Gerätes zufolge liegt die Messunsicherheit im gesamten Messbereich ($0,005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bis $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) typischerweise bei 1 % und die Reproduzierbarkeit liegt bei 0,5 % (TAURUS Instruments AG 2018). Die Wärmeleitfähigkeit wurde an Faserstoff-Probekörpern ohne Zusatz-, Hilfs- oder Klebstoffe durchgeführt (siehe Abschnitt 6.3). Untersucht wurde eine Probe je Variante aus Tabelle 6.18 und aus Tabelle 6.17. Von den vier Wiederholungen wurde diejenige Probe ausgewählt, die dem Mittelwert der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme am nächsten lag. Die Faservliesstoffe (Abschnitt 6.3) wurden für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in einen

Streurahmen mit der Abmessung $0,6 \times 0,6 \times 0,05 \text{ m}^3$ eingebracht. Die Rohdichte der Probekörper lag bei $50 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$. Die Feuchte der Faserstoffe wurde vor der Probekörperherstellung mit dem Feuchtebestimmer DLB (KERN & SOHN GmbH, Balingen-Frommern) bestimmt.

Der **Probekörpereinbau** erfolgte unter Kraftvorgabe der Schließmechanik, um die Proben mit derselben Dicke zu messen und die Vergleichbarkeit vor dem Hintergrund des Rohdichteinflusses (siehe Abschnitt 5.3) und der direkt in die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit eingehenden Probekörperdicke (siehe Abschnitt 2.3.3) zu gewährleisten.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte mit 10 K **Temperaturdifferenz** zwischen Heiz- und Kühlplatte bei Probenmitteltemperaturen von ca. 10°C , 20°C und 30°C . Die Messungen wurden mit sechs Wiederholungen in jeder Temperaturstufe nach Einstellen des Stabilitätskriteriums von 0,3 % Unterschied zwischen zwei Messungen im Abstand von 1 h durchgeführt. Jede Messung dauerte somit ca. 24 h. Aus den ermittelten Werten der drei Temperaturstufen wurde eine Regressionsgerade berechnet und die Wärmeleitfähigkeit bei 10°C Probenmitteltemperatur (λ_{10}) bestimmt.

6.5 Datenverarbeitung und statistische Methoden

Die elektronischen Rohdaten aus unterschiedlichen Formaten (*.xml, *.txt, *.csv, *.pdf) sowie die schriftlich im Labornotizbuch festgehaltenen Daten wurden zuerst in MS-Excel importiert und gesammelt, dann in den Arbeitsblättern sortiert und gruppiert und anschließend im *.xlsx-Format gespeichert. Die deskriptive Beschreibung und graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit der Software R und der Oberfläche R-Studio (R Core Team 2017). Im Anhang sind die angewendeten Pakete und R-Codes im Sinne der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse beispielhaft aufgeführt. In der weiteren statistischen Auswertung zur Identifikation signifikanter Unterschiede zwischen Gruppen wurde als erstes geprüft, ob parametrische oder nicht-parametrische Verfahren angewendet werden mussten. Die ANOVA (Analysis of Variance) zur Varianzanalyse ist ein **parametrisches Verfahren**, welches voraussetzt, dass die Daten normalverteilt sind und die Varianzen homogen verteilt sind. Auf Normalverteilung wurde bis zu einem Stichprobenumfang von 5000 mittels Shapiro-Wilk-Test geprüft (Yap & Sim 2011). Die Annahme der Normalverteilung wurde ab einem p-Wert größer 0,05 verworfen. Der Levene-Test kam in der Überprüfung der Varianzhomogenität zum Einsatz (Lim & Loh 1996). Ergab der Test einen p-Wert größer 0,05 wurde davon ausgegangen, dass Homoskedastizität vorliegt. Waren die Daten sowohl normalverteilt als auch die Homogenität der Varianzen gegeben, konnte als Post-Hoc-Test ein TukeyHSD-Test angewendet werden. Ein adaptierter, robuster TukeyHSD-Test wurde durchgeführt, wenn die Daten zwar normalverteilt, die Varianzen jedoch heterogen verteilt waren (Herberich et al. 2010). Lagen die Daten nicht normalverteilt vor, kam ein Kruskal-Wallis-Test als **nicht-parametrisches Verfahren** äquivalent zur klassischen ANOVA zur Anwendung. In diesem Fall wurden signifikante Unterschiede mit dem Wilcoxon-Mann-Whitney-Test durch paarweise Vergleiche der Mittelwerte identifiziert.

Die Signifikanzniveaus sind durch die Anzahl Asteriske (*) gekennzeichnet. Die zugehörige Überschreitungswahrscheinlichkeit ist unter den jeweiligen Abbildungen oder Signifikanztabellen angegeben.

Der **Korrelationskoeffizient** misst das Ausmaß des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen. Ein Wert von 1 zeigt eine starke Beziehung zwischen der abhängigen und unabhängigen Variable an. Ein Wert näher an 0 deutet auf eine schwache Beziehung zwischen den Variablen hin. Die einfache **lineare Regression** ist eine weitere statistische Methode, um Zusammenhänge zwischen

Variablen zu untersuchen. Das Bestimmtheitsmaß stellt in einem linearen Regressionsmodell den Anteil der Varianz für die abhängige Variable dar.

Abbildung 6.8: Statistische Darstellung der Messergebnisse. **a**, Balkendiagramm. **b**, Punktdiagramm. **c**, Boxplot. Statistische Kennwerte: a = arithmetisches Mittel + Standardabweichung; b = arithmetisches Mittel; c = arithmetisches Mittel - Standardabweichung; d = Ausreißer; e = $+1,5 \cdot \text{IQR}$; f = 75 %-Perzentil; g = Median; h = 25 %-Perzentil; i = $-1,5 \cdot \text{IQR}$.

Zur graphischen Darstellung wurden Diagramme nach Abbildung 6.8 erstellt. Dabei wurden aus den gruppierten Daten der Stichprobenumfang, das arithmetische Mittel und die Standardabweichung berechnet. Die Höhe der **Balkendiagramme** entspricht dem Mittelwert der Gruppe und wird durch die Standardabweichung in Form von Fehlerbalken ergänzt. In den ebenfalls verwendeten gestapelten Balkendiagrammen gibt die Höhe des Balkens den Anteil der Gruppe an der Gesamtheit an. Wurden Mittelwerte als **Punktdiagramme** dargestellt, so ist der Stichprobenumfang unterhalb der Abbildung angegeben oder die Standardabweichung als Fehlerbalken kenntlich gemacht. In den **Boxdiagrammen** wurden mehrere statistische Kennwerte in einer Darstellung zusammengefasst. Als Mittelwerte sind der Median und das arithmetische Mittel dargestellt. Der Interquartilabstand (IQR) als Streuungsmaß zwischen dem 25 %-Perzentil und dem 75 %-Perzentil umfasst 50 % der Messwerte. Die Whisker reichen bis zum 1,5-fachen IQR. Messwerte außerhalb des 1,5-fachen IQR werden als Ausreißer bezeichnet und durch Punkte visualisiert. Zur Darstellung zeitlicher Abläufe wurden **Liniendiagramme** verwendet. Die Anpassung der Achsenabschnitte, der Achsenbeschriftungen und der Legenden erfolgte nach Bedarf manuell.

Weiterhin kam ein zweistufiges, faktorielles Screening Design in Taguchi L12 Anordnung zur Anwendung, um Effekte auf eine Zielgröße zu untersuchen. Die graphische Darstellung erfolgte in Form von **half-normal plots** (auch bekannt als *Daniel plot*) nach C. Daniel (1959) (Abbildung 6.9a). In einem *half-normal plot* gibt die Plot-Position der Faktoren in Zusammenhang mit dem Signifikanzniveau α Aufschluss über Effekte auf untersuchte Zielgrößen. Grundlage dieser Schätzung ist die Differenz zwischen den Mittelwerten der Zielgröße als Antwort auf die untersuchten zwei Stufen der Faktoren (Grömping 2015). Dabei weichen die Plot-Positionen der „aktiven“ Effekte von den auf einer Linie durch den Ursprung liegenden Faktoren ab, da die Effekte

größer sind, als man von der Größe der zufälligen Variation innerhalb des Experiments erwarten würde (Grömping & J. Fox 2015). Rückschlüsse zu Interaktionen zwischen einzelnen Effekten sind nicht möglich.

Abbildung 6.9: Statistische Darstellung der Messergebnisse. **a**, Hal-normal plot. **b**, Main effects plott. Statistische Kennwerte: *a* = Haupteffekte; *b* = Nebeneffekte; *c* = Auswirkung eines Effekts in der Stufe -1 (z.B. niedrige Drehzahl); *d* = Verbindungslinie zur Verdeutlichung der Auswirkung; *e* = Auswirkung eines Effekts in der Stufe 1 (z.B. hohe Drehzahl).

Die Auswirkung der Effekte kann mit **main effects plots** nach Grömping (2014) dargestellt werden. Hier ist die Differenz zwischen den arithmetischen Mittelwerten der Effekte für die zwei untersuchten Stufen der Faktoren separat dargestellt. Die graphische Auswertung gibt in Ergänzung zum **half-normal plot** einen Hinweis darauf, in welcher Richtung sich der Effekt auf die Zielgröße auswirkt (Grömping & J. Fox 2015). Die Anpassung der Achsenabschnitte, der Achsenbeschriftungen und der Legenden erfolgte nach Bedarf manuell.

7 Ergebnisse und Diskussion

7.1 Grundlegende Untersuchungen zur Prozessführung in der labortechnischen Faserstoffherzeugung

7.1.1 Einleitung

Das RMP- und TMP-Verfahren sind dem Teilgebiet des Zerkleinerns der mechanischen Verfahrenstechnik zuzuordnen (Stieß 2009, S. 2). Bedingt durch den hierarchischen Aufbau des Agglomerat-Aggregats Holz (Bohnet 2004, S. 14) stellen der in den Verfahren stattfindende hydrothermische Aufschluss und die mechanische Zerfaserung einen komplexen verfahrenstechnischen Prozess dar. Die Beschaffenheit der erzeugten Faserstoffe unterliegt einer Vielzahl an prozessspezifischen Einflussfaktoren.

Das **Ziel** der grundlegenden Untersuchungen zur Prozessführung in der labortechnischen Faserstoffherzeugung ist es, zuerst die Ausgangs-Partikelgröße der Laborhackschnitzel zu ermitteln und die Frage zu beantworten, welche Ziel-Partikelgröße im Aufschluss erreicht werden soll. Auf Grundlage der ermittelten Anforderungen kann die Prozessführung angepasst werden, denn weder das Zerkleinerungsverhalten noch die Auswirkungen der Prozessparameter auf die Beschaffenheit der Faserstoffe und die Produkteigenschaften der Holzfaserdämmstoffe sind genau vorhersagbar.

Eine weitere Fragestellung betrifft die unbekannten Auswirkungen von Prozessparametern auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme in der labortechnischen Faserstoffherzeugung. Die **fundamentale Zielgröße** in der Untersuchung von Mahlscheiben ist die spezifische elektrische Leistungsaufnahme. Diese wird unter anderem durch die elasto-mechanischen (rheologischen) Eigenschaften der Holzart beeinflusst (Koran 1981). Ein weiterer Bestandteil der grundlegenden Untersuchungen ist die Ermittlung der unbekannten Zielgröße des Durchsatzes der Laborrefineranlage mit den Holzarten Fichte und Buche als Grundlage zur Berechnung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme. Außerdem werden Effekte auf die Holzfeuchte der Faserstoffe nach dem Aufschluss untersucht, um erste Rückschlüsse zu den Vorgängen der Feuchteaufnahme und -abgabe bei dem Erwärmen von Hackschnitzeln in Sattdampfatmosfera ziehen zu können. Diese Erkenntnisse sind in der Konsequenz für die Auswahl und Auslegung der Verfahrensschritte erforderlich, um aussagekräftige und reproduzierbare Ergebnisse zu produzieren.

Auf Wissen aus der Industrie- und Laborpraxis zur Untersuchung der Faserstoffherzeugung kann nur bedingt zurückgegriffen werden. Der Einfluss von Mahlscheiben und Aufschlussbedingungen auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme, den thermischen Energiebedarf und die maßgebliche Produkteigenschaft Wärmeleitfähigkeit im Zusammenhang mit der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen wurde bisher noch nicht im Labormaßstab untersucht.

7.1.2 Ausgangs-Partikelgröße der Laborhackschnitzel und Ziel-Partikelgröße industrieller Faserstoffe

Ausgangs-Partikelgröße und Schüttdichte der Laborhackschnitzel

Neben der Holzqualität ist die Verteilung der Ausgangs-Partikelgröße der Hackschnitzel ausschlaggebend für die Beschaffenheit der daraus erzeugten Faserstoffe, wie von Hartler (1963) und Behler et al. (1981) beschrieben. Aus der Massenverteilungsdichte der Laborhackschnitzel in Abbildung 7.1 geht hervor, dass die Hackschnitzel beider Holzarten überdimensionierte (F2-Fraktion) und unterdimensionierte (F4-Fraktion) Partikel und Feinanteil (F5-Fraktion) enthalten.

Abbildung 7.1: Ausgangs-Partikelgröße von Laborhackschnitzeln nach dem Trommelhacker: **a**, Fichtenholz-Hackschnitzel. **b**, Buchenholz-Hackschnitzel. Siebfraktionierung nach SCAN-CM 40 (2001). $N=3$ mit $n=2$.

Ziel der Trommelsiebung mit den Siebmaschenweiten war es, überdimensionierte Partikel und Feinanteil aus den Hackschnitzeln zu entfernen. Mittels Trommelsiebung der frischen Hackschnitzel konnte der Anteil überdimensionierter Partikel (F2-Fraktion) bei beiden Holzarten reduziert werden (Tabelle 7.1). Der Feinanteil (F5-Fraktion) wurde durch die Trommelsiebung fast vollständig entfernt. Bei den Fichten- und Buchenholz-Hackschnitzeln stieg der Anteil der „pin chips“ (F4-Fraktion) durch die Trommelsiebung leicht an. Weiterhin ist anzumerken, dass die F3a-Fraktion ebenfalls reduziert wurde und die F3b-Fraktion leicht höher liegt.

Tabelle 7.1: Istwerte der Hackschnitzel-Gutfraktion nach dem Trommelsieb. Sollwerte zur Erzeugung von TMP nach dem Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (2001). $N=3$ mit $n=3$.

Fraktion	Sieb	Sollwert (%)	Istwert			
			Fichte		Buche	
			$\bar{x}$ (%)	σ (%)	$\bar{x}$ (%)	σ (%)
F1	45 mm Lochsieb	0	0	0	0	0
F2	8 mm Spaltsieb	<10	6,4	2,5	2,6	0,6
F3a	13 mm Lochsieb		24,1	2,8	32,8	4,9
F3b	7 mm Lochsieb		46,2	2,6	43,2	1,7
F4	3 mm Lochsieb	<6	22,9	2,4	20,9	4,1
F5	Rest	0	0,3	0,0	0,5	0,0

Die Gutfraktion mit optimalen Abmessungen der Hackschnitzel für den thermomechanischen Aufschluss stellt nach dem Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (2001) die F3-Fraktion dar. Allerdings liegt der Anteil der F3-Fraktion im Vergleich zu Scheibenhackern und Profilerspanern bei Trommelhackern am niedrigsten (Parameswaran et al. 1985). Deppe & Ernst (1996, S. 48) weisen darauf hin, dass der Feinanteil bei Trommelhackern gegenüber Scheibenhackern oder Profilerspanern bauartbedingt erhöht ist.

Die Hackschnitzeldimension der Holzart Fichte hat Patt et al. (1980) zufolge erheblichen Einfluss auf die technologischen Eigenschaften von TMP-Papierstoffen. Insbesondere der Splittergehalt liegt demnach beim Einsatz der F5-Fraktion ungewöhnlich hoch. Reißlänge, Berstfestigkeit und Durchreißfestigkeit von Papieren, hergestellt aus der F4-Fraktion, nehmen gegenüber der F3-Fraktion deutlich ab. Weiter stellten Patt et al. (1980) fest, dass der Langfaseranteil von Fichtenholz-TMP aus der F4-Fraktion niedriger und der Mehlstoffanteil höher liegen. Neben den makroskopisch beobachtbaren Partikelgrößen rufen die Zerspanungsarten nach Patt et al. (1981) Faserkürzungen und Zellwandschädigungen in der Mikromorphologie der Hackschnitzel hervor, die sich in den kleineren Partikeln stärker auf die Stoffqualität auswirken. Die bauartbedingt ungünstigeren Schnittwinkel der Trommelhacker, insbesondere beim Messereingriff auf der Oberseite des Hackguts und die Nachzerkleinerung des Rückstands auf dem Hackerauslasssieb sind nachteilig für die Massenverteilungsdichte (Aghakhani et al. 2020).

Zum Zeitpunkt des Verfassens der Dissertation lagen keine Untersuchungen zum Einfluss der **Auswirkungen der Hackschnitzeldimension** auf die Produkteigenschaften von Holzfaserdämmstoffen vor. Es ist nicht auszuschließen, dass der hohe Anteil der F4-Fraktion in den Buchen- und Fichtenholzhackschnitzeln die Dispersitätseigenschaften der daraus hergestellten Holzstoffe beeinflusst. Für den Betrieb der Laborrefineranlage war es jedoch notwendig, die Übergrößen und den (mineralischen) Feinanteil zu entfernen, um die Mahlscheiben zu schonen. Mit Trommelhackern hergestellte Industriebackschnitzel für die Produktion von Holzwerkstoffen besitzen größere nominelle Hackschnitzellängen von 25 mm bis 35 mm und mehr. Im Vergleich zu den verwendeten Laborhackschnitzeln mit einer nominellen Hackschnitzellänge von 16 mm kann dadurch der Durchsatz erhöht und der elektrische Energiebedarf für die Erzeugung der Hackschnitzel gesenkt werden (Maier 1983).

Die Bestimmung der Schüttdichte der klassierten Hackschnitzel ergab bekannte Werte für die Holzarten Fichte und Buche (Tabelle 7.2) (Deppe & Ernst 1996, S. 54–57).

Tabelle 7.2: Schüttdichte der Hackschnitzel-Gutfraktion nach dem Trommelsieb. $N=3$ mit $n=3$.

Holzart	Schüttdichte $\text{kg}_{\text{Gatro}}/\text{m}^3$	
	$\bar{x}$	σ
Fichtenholz-Hackschnitzel	154	3,08
Buchenholz-Hackschnitzel	202	4,34

Ziel-Partikelgröße und Dispersitätseigenschaften industrieller Faserstoffe

Einen Überblick über die 50 %- und 97 %-Perzentilen der Luftstrahl-Prüfsiebung von MDF-, HDF- und Holzfaserdämmstoff-Fasern von vier Holzfaserdämmstoffherstellern gibt Tabelle 7.3. Daraus ist abzuleiten, dass MDF-Fasern die geringsten Prüfsieb-Maschenweiten und damit den höchsten Aufschlussgrad aufweisen. Das 97 %-Perzentil liegt bei HDF-Fasern höher, was auf einen größeren Anteil an nicht aufgeschlossenen Faserbündeln zurückzuführen ist.

Die Prüfsieb-Maschenweiten des **Medianwerts** und des 97 %-Perzentils der Holzfaserdämmstoff-Fasern liegen deutlich höher als diejenigen der MDF-Fasern. Außerdem bestehen zwischen den einzelnen Herstellern deutliche Unterschiede. Die größten Prüfsieb-Maschenweiten weisen die Holzfaserdämmstoff-Fasern 1 und 2 auf. Die Holzfaserdämmstoff-Fasern 3 und 4 liegen im Bereich der Prüfsieb-Maschenweiten der HDF-Faser. Die HDF-Faser und insbesondere die Holzfaserdämmstoff-Fasern 1 und 2 sind nach subjektiv-optischen Kriterien als „grob“ zu beschreiben. Die MDF-Faser und die Holzfaserdämmstoff-Faser 4 dagegen als „fein“. Eine Sonderstellung nimmt die Zellulosedämmung durch den hohen Medianwert und das hohe 97 %-Perzentil ein. Die Zellulosedämmung enthält zahlreiche voluminöse Agglomerate und nicht aufgeschlossene, blättchenförmige Partikel. Diese Eigenschaften sind auf den trockenen Aufschluss des Altpapiers und die enthaltenen Trockenfestmittel (Stärke) und mineralischen Füllstoffe (Calciumcarbonat und Kaolin) zurückzuführen.

Tabelle 7.3: Dispersitätseigenschaften industrieller Faserstoffe nach der Luftstrahl-Prüfsiebung. $n=2$.

Produkt	Holzart	Prüfsieb-Maschenweite	
		$\bar{x}_{50,3}$ μm	$\bar{x}_{97,3}$ μm
MDF-Faser	Kiefer	117	791
HDF-Faser	Kiefer	237	1496
Zellulosedämmung	Altpapier	746	1933
Holzfaserdämmstoff-Faser 1	Fichte	497	2493
Holzfaserdämmstoff-Faser 2	Fichte	209	1823
Holzfaserdämmstoff-Faser 3	Kiefer	312	1209
Holzfaserdämmstoff-Faser 4	Kiefer	291	1042

Die quantitative Bildanalyse ergänzt die Erkenntnisse zur Größenverteilung des Partikelkollektivs aus der Luftstrahl-Prüfsiebung mit Formfaktoren individueller Partikel. Für die Analyse der Ziel-Partikelgröße wurde die geodätische Länge und das Partikelform-Verhältnis mit dem Unterscheidungskriterium Elongation nach Gleichung 6.5 gewählt.

Die 10 %-Perzentilen der geodätischen Länge differieren zwischen den Holzstoffen unwesentlich. Die 50 %- und 97 %-Perzentilen der **geodätischen Länge** spiegeln hingegen die in der Luftstrahl-Prüfsiebung ermittelten Abstufungen der einzelnen Holzstoffe wider. Den Holzstoffen, welche eine feinere Partikelgrößenverteilung in der Luftstrahl-Prüfsiebung aufweisen, kann

eine geringere geodätische Länge in der quantitativen Bildanalyse nachgewiesen werden. Die Holzfaserdämmstoff-Fasern 1 bis 3 weisen insbesondere in der 97 %-Perzentile eine hohe geodätische Länge auf. Die Holzfaserdämmstoff-Faser 4 gleicht dagegen der MDF-Faser in Bezug auf geodätische Länge. Bei der Betrachtung des Partikelform-Verhältnisses fällt auf, dass die MDF-, HDF- und die Holzfaserdämmstoff-Faser 4 einen höheren Anteil an längeren, faserartigen Partikeln als die restlichen Faserstoffe aufweisen. Ein Erklärungsansatz hierfür ist ein höherer Aufschlussgrad dieser Faserstoffe, der weniger Faserbündel und Bruchstücke mit sich bringt. Die Zellulosedämmung weist die kürzesten Längen der untersuchten Faserstoffe auf. Die Zellulosedämmung kann aufgrund der zahlreichen voluminösen Agglomerate und nicht aufgeschlossenen, blättchenförmigen Partikeln mit der angewendeten Methode nicht aussagekräftig charakterisiert werden.

Tabelle 7.4: Ziel-Partikelgröße (anzahlgewichtete Dispersitätseigenschaften) industrieller Faserstoffe nach der quantitativen Bildanalyse. n=3.

Produkt	Holzart	Geodätische Länge			Partikelform-Verhältnis kornförmig ($E > 0,3$) / faserartig ($E \leq 0,3$)
		$\bar{x}_{10,2}$ μm	$\bar{x}_{50,2}$ μm	$\bar{x}_{97,2}$ μm	
MDF-Faser	Kiefer	36	113	2901	1,14
HDF-Faser	Kiefer	40	198	3213	1,47
Zellulosedämmung	Altpapier	27	61	1038	4,16
Holzfaserdämmstoff-Faser 1	Fichte	43	610	4930	0,38
Holzfaserdämmstoff-Faser 2	Fichte	45	252	4060	0,61
Holzfaserdämmstoff-Faser 3	Kiefer	49	434	4001	0,45
Holzfaserdämmstoff-Faser 4	Kiefer	45	114	2801	1,29

E = Elongation

Bezüglich der Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist festzuhalten, dass die Dispersitätseigenschaften der industriellen Faserstoffe, die zur Herstellung von Dämmstoffen mit vergleichbaren Produkteigenschaften verwendet werden, kein einheitliches Bild ergeben. Die Unterschiede sind zu groß, als dass ein bewährter Stand der Technik daraus abgeleitet werden könnte. Die weiter unten in dieser Arbeit ermittelte Wärmeleitfähigkeit industrieller Faserstoffe und Dämmstoffe in Tabelle 7.16 verstärkt diesen Eindruck. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird in den weiteren Untersuchungen die Beschaffenheit der labortechnischen Faserstoffe genauer untersucht. In der labortechnischen Faserstofferzeugung wird versucht, die Bandbreite sowohl der industriellen Holzfaserdämmstoff-Fasern als auch der MDF-Fasern bezüglich deren Dispersitätseigenschaften abzubilden.

7.1.3 Untersuchung grundlegender Parameter der Prozessführung auf ausgewählte Zielgrößen der labortechnischen Faserstofferzeugung

Zielgröße Durchsatz der Laborrefineranlage

Für die Berechnung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme ist die Ermittlung des Durchsatzes grundlegend. Nur durch eine genaue Ermittlung des Massenflusses des Holzes ist es möglich, hierzu präzise Aussagen zu treffen. Nach Abbildung 7.2 ist die Holzart maßgeblich für den Durchsatz. Das Mahlscheibenmuster und der Sattdampfdruck haben einen untergeordneten Effekt. Der Einfluss der Holzart ist durch den Dichteunterschied zwischen den untersuchten Holzarten Fichte und Buche zu erklären.

In Abbildung 7.3 ist der Durchsatz für die Holzarten Fichte und Buche dargestellt. Die linea-

Abbildung 7.2: Effekte auf den Durchsatz der Laborrefineranlage. Half-normal plot für die Zielgröße Durchsatz. Den größten Effekt auf den Durchsatz hat die Holzart, markiert mit B, $\alpha=0,1$. 2-stufiges, faktorielles Screening-Design.

re Regression zeigt, dass der Durchsatz der Laborrefineranlage mit hoher Wahrscheinlichkeit linear von der Förderleistung der Einspeiseschnecke abhängt. Durch die ebenfalls dargestellte Geradengleichung ist es möglich, den Durchsatz der Laborrefineranlage in Abhängigkeit der Förderleistung der Einspeiseschnecke zu berechnen. Damit ist eine Voraussetzung erfüllt, um die spezifische elektrische Leistungsaufnahme in der Faserstofferzeugung mit den Holzarten Fichte und Buche zu bestimmen.

Zielgröße spezifische elektrische Leistungsaufnahme des Refinermotors im TMP-Verfahren

Eine weitere Voraussetzung für die Berechnung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme ist die Ermittlung der Leerlaufleistung und der „no treatment“-Leistung P_{NT} (Abschnitt 3.4.2). Die „no treatment“-Leistung unterscheidet sich von der Leerlaufleistung durch die Anwesenheit eines Fördermediums wie Wasser oder Dampf. Bei der Laborrefineranlage ist keine Veränderung

Abbildung 7.3: Ermittlung des Durchsatzes der Laborrefineranlage: **a**, Durchsatz mit der Holzart Fichte. **b**, Durchsatz mit der Holzart Buche. Die lineare Regression liefert die Geradengleichung zur Berechnung des Durchsatzes bei einer beliebig gewählten Förderleistung der Einspeiseschnecke. $n=12$.

von P_{NT} mit steigendem Sattedampfdruck festzustellen (Abbildung 7.4). Unregelmäßigkeiten im Verlauf von P_{NT} zwischen den Zeitpunkten 10:44:00 und 10:46:00 sind auf Kondensatbildung innerhalb der Refineranlage zurückzuführen. Das Kondensat gelangt zwischen die Mahlscheiben und ruft die Schwankungen hervor. Die Leerlaufleistung beträgt im Mittel der regelungsbedingten Schwankungen 13,07 kW. Im Folgenden wird zur Berechnung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme ein Wert von 13,1 kW herangezogen.

Bei der Untersuchung der physikalisch-technologischen Eigenschaften von Mahlscheiben ist die **spezifische elektrische Leistungsaufnahme** des Refinermotors eine wichtige Zielgröße. Zum einen ist es wichtig, in der Versuchsplanung und -durchführung unerwünschte Einflüsse auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme zu vermeiden. Zum anderen wird anhand dieser Zielgröße der Einfluss des Mahlscheibenmusters auf den elektrischen Energiebedarf untersucht. In Abbildung 7.5 a ist dargestellt, dass unabhängig vom Mahlscheibentyp der Mahlspalt maßgeblich für die spezifische elektrische Leistungsaufnahme der Laborrefineranlage ist (alle untersuchten Faktoren sind in Tabelle 6.14 aufgelistet). Diese Erkenntnis stimmt mit den Ergebnissen von Kerekes (2010) überein. Demzufolge wird durch die Verringerung des Mahlspalts die Kraft auf die Fasern im Mahlspalt erhöht (Abbildung 7.5b). Im Gegensatz zu Krug (2010, 113 ff.) wirkte sich die Kochzeit (1 min und 10 min) nicht entscheidend auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme aus.

Die Effekte Hackschnitzelfeuchte und Aufschlusstemperatur treten nicht signifikant hervor. Es könnte sein, dass eine niedrigere Hackschnitzelfeuchte zu einer geringeren spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme führt. Darauf deutet Abbildung 7.5c hin. Der Wassergehalt in den Hackschnitzeln kann einen Einfluss auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme haben. So geht Atack & Wood (1973) zufolge die spezifische elektrische Leistungsaufnahme von 1876 kWh/t auf 1488 kWh/t zurück, wenn die Konsistenz (Gleichung 6.2) vor dem Refiner von 13,3 % auf 24 % erhöht wird.

Die Untersuchungen von Asplund (1940a) und Krug (2010, S. 113) bestätigen den hier sichtbaren

Abbildung 7.4: Ermittlung der „no treatment“-Leistung P_{NT} der Laborrefineranlage: **a**, Zeitlicher Verlauf des Sattedampfdrucks. **b**, Zeitlicher Verlauf der „no treatment“-Leistung P_{NT} . Der Anstieg des Sattedampfdrucks wirkt sich nicht auf P_{NT} aus. Der Mittelwert von P_{NT} liegt bei 13,07 kW. Die Leistungsaufnahme schwankt regelungsbedingt.

Trend für den Einfluss der Aufschlussstemperatur (Abbildung 7.5d). Untersuchungen zum Einfluss niedriger Aufschlussstemperaturen und zur drucklosen Zerfaserung mit Nadel- und Laubholz im Zusammenhang mit speziellen Mahlscheiben und Einscheibenrefinern sind nicht bekannt. Der Durchsatz dürfte im Falle der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme keinen Effekt haben (Abbildung 7.5e).

Zielgröße Holzfeuchte der Faserstoffe nach dem Aufschluss

Im vorherigen Abschnitt wurde festgestellt, dass die Hackschnitzelfeuchte keinen signifikanten Einfluss auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme hatte. Die Holzfeuchte lag bei den Untersuchungen bei 60 % und 95 %. Durch einen größeren Unterschied zwischen der Holzfeuchte könnte der Effekt auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme größer werden. Insbesondere, wenn sich die Holzfeuchte dem Fasersättigungsbereich oder der Wassersättigung annähert. Inwiefern die Holzfeuchte allerdings von der Sattedampfatmosfera im Kocher des Refiners beeinflusst wird ist nicht bekannt. Deshalb wurde, auch vor dem Hintergrund des thermischen Energiebedarfs im TMP-Verfahren sowie der anschließenden Trocknung der Faserstoffe, mit einem zweistufigen Screening-Design untersucht, welche Prozessgröße im TMP-Verfahren einen entscheidenden Effekt auf die Holzfeuchte der Fasern nach dem Aufschluss hat.

Es konnte festgestellt werden, dass unter den untersuchten Prozessparametern (Tabelle 6.14) die **Sattedampftemperatur** den stärksten Einfluss auf die Holzfeuchte der Faserstoffe nach dem Aufschluss hat (Abbildung 7.6a). Bei beiden Sattedampf-Druckstufen liegt die Holzfeuchte der Faserstoffe nach dem Aufschluss über der Holzfeuchte der Hackschnitzel vor dem Aufschluss. Der höhere Wert für die Holzfeuchte der Faserstoffe nach dem Aufschluss mit 8 bar deutet darauf hin, dass die Hackschnitzel unter höherem Sattedampfdruck mehr Wasser enthalten (Abbildung

Abbildung 7.5: Effekte auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme: **a**, Half-normal plot für die Zielgröße spezifische elektrische Leistungsaufnahme (SEL). A = Hackschnitzelfeuchte; B = Aufschlusstemperatur; C = Durchsatz; D = Mahlpalt. Den größten Effekt zeigt der Mahlpalt (D), $\alpha=0,1$. **b**, Main effect plot für den Haupteffekt Mahlpalt(D): Eine Verringerung des Mahlpalts führt zu einer höheren Leistungsaufnahme. **c-e**, Main effect plots für die Nebeneffekte, die ab einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,4$ sichtbar werden. **c**, Eine niedrigere Hackschnitzelfeuchte (A) könnte die spezifische elektrische Leistungsaufnahme senken. **d**, Die Aufschlusstemperatur (B) hat aufgrund der geringen Differenz der Mittelwerte einen untergeordneten Effekt. **e**, Die Variation des Durchsatzes (C) hat ebenfalls einen untergeordneten Effekt. Zweistufiges, faktorielles Screening-Design in Taguchi L12 Anordnung.

7.6b). Tiefgreifendere Erklärungsansätze sind im Anschluss an die Untersuchungen im Abschnitt 7.2 formuliert.

Die Holzfeuchte der Hackschnitzel vor dem Aufschluss scheint keinen maßgeblichen Effekt auf

Abbildung 7.6: Effekte auf die Holzfeuchte der Fasern nach dem TMP-Aufschluss: **a**, Half-normal plot für die Zielgröße Faserfeuchte. Den größten Effekt hat die Sattedampftemperatur (B), $\alpha=10\%$. **b**, Main effect plot für den Haupteffekt Sattedampftemperatur: Eine Erhöhung der Sattedampftemperatur zieht eine höhere Faserfeuchte nach dem Aufschluss nach sich. **c**, Die Hackschnitzelfeuchte vor dem Refiner könnte ebenfalls einen Effekt auf die Faserfeuchte nach dem Aufschluss haben, $\alpha=40\%$. Zweistufiges, faktorielles Screening-Design in Taguchi L12 Anordnung.

die Holzfeuchte der Fasern nach dem Aufschluss zu haben (Abbildung 7.6c). Allerdings muss hierbei die eingeschränkte Aussagekraft des zweistufigen faktoriellen Screening-Designs und die große Standardabweichung berücksichtigt werden. Eine Vergleichmäßigung der Holzfeuchte, wie in Deppe & Ernst (1996, S. 52) angesprochen, ist nicht erkennbar.

Die Holzfeuchte der Fasern nach dem TMP-Aufschluss ist mit einfachen Mitteln messbar. Die

Holzfeuchte der Hackschnitzel in Sattdampfatmosfera ist nicht bekannt. Sie ist nicht ohne weiteres zu ermitteln, da **Druck und Temperatur** den Einsatz von Messgeräten erschweren. Theoretisch kann die Holzfeuchte der Hackschnitzel unter Sattdampfdruck über den Dampfbedarf zur Erwärmung berechnet werden. In Abschnitt 7.2 wird die Holzfeuchte in Sattdampfatmosfera experimentell ermittelt und dem berechneten Dampfbedarf gegenübergestellt.

7.1.4 Erkenntnisse und Konsequenzen für die weiteren Untersuchungen

Die in den vorhergehenden Abschnitten gewonnenen Erkenntnisse zur Charakterisierung der labortechnischen Faserstoffherzeugung im TMP-Verfahren sind von Bedeutung für die Auswahl und Auslegung der Verfahrensschritte in den weiteren Untersuchungen.

Die Laborhackschnitzel enthalten nach dem Trommelhacker überdimensionierte Hackschnitzel und Feinanteil. Vorversuche zeigten, dass insbesondere die überdimensionierten Hackschnitzel die thermomechanische Faserstoffherzeugung beeinträchtigen, da deren Zuführung in den Mahlpalt zu **Leistungsspitzen** führt. Nach dem Trommelsieb enthielt die Gutfraktion keine der ganz großen überdimensionierten Hackschnitzel mehr und der (mineralische) Feinanteil wurde ebenfalls entfernt. Die Schüttdichte der Laborhackschnitzel war mit der von industriellen Hackschnitzeln aus der MDF-Produktion vergleichbar.

Die Analyse von **Dispersitätseigenschaften** industrieller Faserstoffe ermöglichte die Quantifizierung der Ziel-Partikelgrößen. Überraschend ist, dass die Holzfaserdämmstoff-Fasern untereinander hohe Differenzen sowohl in der gravimetrischen Luftstrahl-Prüfsiebung als auch in der quantitativen Bildanalyse aufwiesen. Das Spektrum reichte von „feiner“ MDF-Qualität mit kurzen Faserlängen und geringem kornförmig-zu-faserartig-Verhältnis bis zu „groben“ Fasern mit großer Faserbündellänge sowie hohem Verhältnis der kornförmigen und faserartigen Partikel. Vorversuche haben gezeigt, dass mit der Laborrefineranlage Faserstoffe mit vergleichbaren Eigenschaften hergestellt werden können. Die geodätische Länge der Faserbündel aus den industriellen Faserstoffen wird dabei unter vergleichbaren Aufschlussbedingungen nicht vollumfänglich erreicht. Dies ist auf die kleinere Ausgangs-Partikelgröße der Laborhackschnitzel im Vergleich zu industriellen Hackschnitzeln aus der Holzwerkstoffherstellung zurückzuführen.

Bezüglich des **Durchsatzes** der Laborrefineranlage ist festzuhalten, dass für den Mahlscheibentyp und den Sattdampfdruck kein Effekt festzustellen ist. Somit können die für die Holzarten Buche und Fichte ermittelten Durchsätze zur Berechnung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme herangezogen werden. Die weiteren Untersuchungen mit Mahlscheiben und beiden Holzarten werden auf Basis dieser Ergebnisse vergleichbar.

Ferner wurde für die Berechnung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme die Leerlaufleistung des Hauptmotors der Laborrefineranlage ermittelt. Die Messung der „no treatment“-Leistung zeigte, dass der Sattdampfdruck keinen Einfluss die spezifische elektrische Leistungsaufnahme hat.

In den weiteren Untersuchungen zur Faserstoffherzeugung mit unterschiedlichen Mahlscheiben muss der **Mahlpalt** über alle Versuche konstant gehalten werden. Eine Vergleichbarkeit ist sonst nicht gegeben. Dies bestätigen Vorversuche, bei denen der Mahlpalt variiert wurde sowie Untersuchungen von Kerekes (2015). Die Untersuchungen zeigen, dass die Hackschnitzelfeuchte in einem geringen Prozentanteil variieren kann ohne die spezifische elektrische Leistungsaufnahme zu beeinflussen. In den weiteren Versuchen sollte außerdem der Durchsatz konstant gehalten werden, da ein Einfluss auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme nicht ausgeschlossen werden kann. Die Kochzeit zeigte keinen Effekt auf die Leistungsaufnahme und kann in Übereinstimmung mit Deppe & Ernst (1996, S. 54) und Brombacher et al. (2016) konstant bei 3 min

gehalten werden.

Die Sattdampf Temperatur kann und sollte variiert werden, um den Einfluss der Mahlscheibe und der Holzart auf die Beschaffenheit sowie die physikalisch-technologischen Eigenschaften der Holzstoffe zu untersuchen. In diesem Zusammenhang kommt der Untersuchung der Holzfeuchte der Hackschnitzel während des Aufschlusses und der Holzfeuchte der Fasern nach dem Aufschluss besondere Bedeutung zu (siehe folgender Abschnitt).

7.2 Untersuchungen zur Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattedampfatmosfera

7.2.1 Einleitung

Im TMP-Verfahren wird Sattedampf zur Erwärmung von Hackschnitzeln eingesetzt. Folglich sind Holz-Wasser-Wechselwirkungen in der Faserstoffherzeugung zu beachten. Insbesondere ist die Sorption von Wasserdampf durch die Hackschnitzel in Präsenz der Sattedampfatmosfera zu erwarten. Darauf weisen auch Malkov et al. (2002) hin. Weitere Zusammenhänge der Holzfeuchte mit dem Erweichungsverhalten von Holz in der Faserstoffherzeugung sind in Abschnitt 2.3.2 beschrieben. Ausgang der Untersuchungen zur Holzfeuchte war die Beobachtung, dass auf den Hackschnitzeln während des thermischen Aufschlusses ein **Kondensationsfilm** aus Wasser sichtbar ist (Abbildung 7.7a). Nach Entspannung des Sattedampfdrucks ist der Kondensationsfilm auf der Oberfläche von Buchenholz-Hackschnitzeln nicht mehr sichtbar (Abbildung 7.7b). Das Phänomen ist auch bei Fichtenholz-Hackschnitzeln zu beobachten.

Abbildung 7.7: Blick durch ein Schauglas in den Druckbehälter des Laborrefiners. **a**, Zu sehen ist ein Kondensationsfilm auf der Oberfläche von Buchenholz-Hackschnitzeln in Sattedampfatmosfera bei 9 bar. **b**, Zu sehen sind die selben Hackschnitzel nachdem der Sattedampfdruck abgebaut wurde. Im Vergleich zu **a** ist der Kondensationsfilm auf der Oberfläche nicht mehr sichtbar.

Nach Blechschmidt (2013, S. 75) sollte die Holzfeuchte vor der mechanischen Faserstoffherzeugung über dem Fasersättigungsbereich liegen. Die Berechnungen von Asplund (1940b) führen zu dem Ergebnis, dass die Hackschnitzel nach der Erwärmung in Sattdampfatmosfera im TMP-Verfahren wassergesättigt sind. Hartler (1977) untersuchte den Einfluss der Ausgangs-Holzfeuchte zwischen 10 % und 60 % auf die Faserqualität zur Papierherstellung und wies nach, dass trockenere Hackschnitzel einen höheren Splittergehalt mit sich bringen. Die Ausgleichsfeuchte und das **Adsorptionsverhalten** von Holz ist im hygroskopischen Bereich für Temperaturen bis 160 °C untersucht worden (Kauman 1956; Noack 1959; Strickler 1968; Engelhardt 1979; Ishikawa et al. 2004). Ebenfalls ist der simultane Massenverlust als Folge der thermischen Beanspruchung bekannt (Lenth & Kamke 2001). Allerdings ist der hygroskopische Bereich für das TMP- und RMP-Verfahren nicht von Interesse. Durch den Einsatz von Frischholz liegt die Holzfeuchte hier typischerweise oberhalb des Fasersättigungsbereichs.

Zum Einfluss der Ausgangs-Holzfeuchte auf den thermischen Energiebedarf in der Faserstoffherzeugung nach dem RMP- und TMP-Verfahren und in der anschließenden Trocknung der Faserstoffe fehlen wissenschaftliche Untersuchungen. Die *in situ* Ermittlung der Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattdampfatmosfera hat zum **Ziel**, einen ersten Beitrag zum Einfluss der Prozessführung auf die Holzfeuchte vor dem Hintergrund der Faserstoffherzeugung für Holzfaserdämmstoffe zu leisten. Dafür wurde ein Versuchsaufbau mit einer gravimetrischen Messeinrichtung entwickelt (Abbildung 6.4). Das Experiment soll Aufschluss darüber geben, wie die Holzfeuchte in der Sattdampfatmosfera mit der Ausgangs-Holzfeuchte und dem Dampfverbrauch zusammenhängt. Nicht zuletzt sind auch die Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks und der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme und -abgabe der Hackschnitzel von Interesse.

7.2.2 Absorption von Wasser in Abhängigkeit des Sattdampfdrucks

Die zur Erwärmung von Hackschnitzeln benötigte **Wärmemenge** wurde nach Gleichung 7.1 berechnet. Ist die Wärmemenge bekannt, kann die entsprechende **Dampfmenge** für die Erwärmung der Hackschnitzel mit der Gleichung 7.2 ermittelt werden. Unter isobaren thermischen Zustandsgrößen ist die im Dampf enthaltene Wärmemenge proportional der Hackschnitzelmasse und der zu erzielenden Temperaturdifferenz. Der **Wärmeübergang** erfolgt durch die freigesetzte Verdampfungsenthalpie bei der Kondensation des Dampfes auf der zugänglichen äußeren und inneren Oberfläche der Hackschnitzel. Das Prinzip der Wärmeübertragung durch Kondensation wird in Brännvall (2009, S. 140) durch den Ausgleich der Wasserdampfpartialdruckdifferenz zwischen dem Sattdampf und der Luft in den Hackschnitzeln beschrieben. Zusätzlich werden Luftanteile durch thermische Ausdehnung ausgetrieben. Der Sattdampf, der in die Lumen eindringt, kondensiert und die Lumen füllen sich mit Wasser.

$$Q = \Delta T(m_H \cdot c_H + m_W \cdot c_W) \quad (7.1)$$

Q	Wärmemenge in J
ΔT	Temperaturdifferenz
m_H	Masse Holz
c_H	Spezifische Wärmekapazität Holz
m_W	Masse Wasser
c_W	Spezifische Wärmekapazität Wasser

$$m_{D,Q} = \frac{Q}{r} \quad (7.2)$$

$m_{D,Q}$	Dampfmenge für die Erwärmung in kg
Q	Wärmemenge
r	Verdampfungsenthalpie

In Abbildung 7.8a ist die Dampfmenge für die Erwärmung von drei Ausgangs-Holzfeuchten über dem Sattdampfdruck aufgetragen. Die Dampfmenge ist von der Ausgangs-Holzfeuchte abhängig, da Wasser eine wesentlich höhere **spezifische Wärmekapazität** besitzt, als die wasserfreie Holzsubstanz. Die **spezifische Verdampfungsenthalpie** ist druckabhängig, deshalb ist der Kurvenverlauf degressiv. In Abbildung 7.8b ist die prozentuale Massenzunahme dargestellt, die sich bei einer vollständigen Absorption der berechneten Dampfmenge infolge von Kondensation ergibt. Die Massenzunahme spiegelt sich in der Holzfeuchte wider und wird im weiteren Verlauf der Ergebnisdarstellung herangezogen. Die Annahme von isobaren thermischen Zustandsgrößen entspricht einem kontinuierlichen Prozess und wurde näherungsweise auf den diskontinuierlichen labortechnischen Prozess angewendet. Ferner wird angenommen, dass sich der lineare Verlauf der spezifischen Wärmekapazität der trockenen Holzsubstanz zwischen 0 °C und 100 °C, wie von Radmanović et al. (2014) dargestellt, auch über 100 °C fortsetzt. Von Interesse ist, ob die zur

Abbildung 7.8: Theoretische Betrachtungen zur Holzfeuchte in Sattdampfatmosfera: **a**, Darstellung der Dampfmenge um 1 kg Holz mit einer Ausgangs-Holzfeuchte von 50 %, 100 % und 150 % auf die Temperatur des entsprechenden Sattdampfdrucks zu erwärmen. **b**, Darstellung der Massenzunahme durch die vollständige Absorption der in a berechneten Dampfmenge. Annahmen: isobare Zustandsgrößen, $c_H = 1,4 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ (Radmanović et al. 2014), $c_W = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $T_0 = 20 \text{ °C}$, Sättigungstabelle für Wasser aus VDI e.V. (2013).

Erwärmung der Hackschnitzel notwendige Dampfmenge tatsächlich absorbiert wird. Deshalb wird in Abbildung 7.9 die *in situ* ermittelte Dampfmenge durch **Massenzunahme** infolge von Absorption des kondensierten Sattdampfs dargestellt. Damit kann der Versuch unternommen werden, den Verlauf mit der berechneten Dampfmenge nach Gleichung 7.3 zu vergleichen.

$$m_D = \frac{(m_s - m_i) \cdot 1000 \text{ g/kg}}{m_i} \quad (7.3)$$

m_D Dampfmenge in g/kg
 m_s Masse der Hackschnitzel in Sattdampfatmosfera
 m_i Einwaage der Hackschnitzel mit der Ausgangs-Holzfeuchte

In diesem Vergleich wird deutlich, dass die *in situ* ermittelten Werte für die Dampfmenge im Mittel mit dem berechneten Verlauf qualitativ assoziiert sind. Der quantitative Vergleich bei einem Sattdampfdruck von 1 bar und 9 bar zeigt, dass die *in situ* Werte innerhalb der berechneten Grenzwerte mit einer Ausgangs-Holzfeuchte von 50 % und 150 % liegen. Dies ist ein **erstes Indiz** dafür, dass die Menge an Sattdampf von den Hackschnitzeln absorbiert wird, die der übertragenen Wärmemenge entspricht. In der Abbildung wird außerdem eine breite Streuung der Messwerte, insbesondere bei der Holzart Buche sichtbar. Dies ist der Ablesegenauigkeit der mechanischen Waage geschuldet. Eine höhere Zahl an Wiederholungen würde die Lage der Mittelwerte im Sinne eines glatten Verlaufs einer Ausgleichskurve wie in Abbildung 7.8 vermutlich ermöglichen.

Abbildung 7.9: Darstellung der *in situ* Dampfmenge durch Massenzunahme infolge absorbierten Sattdampfs. Untersuchung an Buchen- und Fichtenholz-Hackschnitzeln mit unterschiedlicher Ausgangs-Holzfeuchte. Die Druckstufen wurden unabhängig voneinander untersucht. $n=5$.

Die Erwärmung der Hackschnitzel in Sattdampfatmosfera geht mit einer Zunahme der Masse einher, die in Abbildung 7.10 dargestellt ist. Die Massenzunahme wurde nach Gleichung 7.4 berechnet.

$$m = \frac{m_s}{m_i} \cdot 100 \quad (7.4)$$

m Massenzunahme in %
 m_s Masse der Hackschnitzel in Sattdampfatmosfera
 m_i Einwaage der Hackschnitzel mit Ausgangs-Holzfeuchte

Mit steigendem Sattdampfdruck nimmt die Masse der Hackschnitzel wie bereits gezeigt zu. Die Unterschiede zwischen den arithmetischen Mittelwerten der einzelnen Holzarten und unterschiedlichen Ausgangs-Holzfeuchte differieren allerdings nicht signifikant. Die maximale Massenzunahme zwischen 1 bar und 9 bar liegt bei rund 25 %, ähnlich wie in Abbildung 7.8b. Weiterhin spricht die Massenzunahme in Verbindung mit dem degressiven Verlauf ebenfalls für einen Zusammenhang zwischen notwendiger Dampfmenge zur Erwärmung und absorbiertem Kondensat. Die ermittelte Massenzunahme liegt rund 10 % bis 20 % niedriger als die in den Untersuchungen von Ishikawa et al. (2004) im Bereich der hygroskopischen Ausgleichsfeuchte ermittelten Massenzunahme (Abschnitt 7.2). Diese Untersuchungen wurden an Sichelanne (*Cryptomeria japonica* D. Don) mit einer Ausgangs-Holzfeuchte von 0 % und einer Verweilzeit in Sattdampf Atmosphäre von 1 h durchgeführt. In den damit erzielten Ergebnissen zeigt sich ebenfalls eine degressive Massenzunahme, ähnlich zu Abbildung 7.9. Die in Asplund (1940b) angegebene Massenzunahme von 140 % bis 150 % bei 8 bar liegt deutlich höher, als die in den vorliegenden Untersuchungen ermittelte Massenzunahme. Auch in dieser Abbildung 7.10 zeigt sich eine breite Streuung der Messwerte, bedingt durch den Versuchsaufbau und die verwendete Messtechnik.

Abbildung 7.10: Änderung der Probenmasse unter Variation des Sattdampfdrucks. Untersuchung der Wasserdampf-Absorption von Buchen- und Fichtenholz-Hackschnitzeln mit unterschiedlicher Ausgangs-Holzfeuchte. Die Druckstufen wurden unabhängig voneinander untersucht. Dauer: 6 min, n=5.

Anhand des Untersuchungsmaterials wird in Abbildung 7.11 berechnete Dampfmenge für die Erwärmung der Hackschnitzel der mittleren tatsächlichen Massenzunahme gegenübergestellt. Im Rahmen der Messungenauigkeit wird der theoretische degressive Verlauf der Massenzunahme über dem Sattdampfdruck auch hier bestätigt. In den Abbildungen 7.11 a und b fällt die niedrige Massenzunahme bei 1 bar auf. In Abbildung c liegt die gemessene Massenzunahme bei niedrigem Sattdampfdruck gleichermaßen niedrig. Ein **Erklärungsversuch** hierfür könnte sein, dass in diesen Fällen die dem Sattdampfdruck entsprechende Temperatur in den Hackschnitzeln nicht in dem untersuchten Zeitraum erreicht wurde. Nach Lashkov et al. (2001) wird flüssiges Wasser im kapillar-porösen System der Hackschnitzel mit einer Geschwindigkeit von $8,33 \cdot 10^{-6}$ m/s transpor-

tiert. Dieser, angesichts einer halben Hackschnitzeldicke von wenigen Millimetern, sehr hohen Geschwindigkeit wirkt der spezifische **hydraulische Widerstand** im inneren der Hackschnitzel entgegen. Zusätzlich kann die Absorption im kapillar-porösen System der Holzart Fichte durch Tüpfelverschluss und bei der Holzart Buche durch Verhyllung der Tracheen reduziert sein (Bonsen 1991). Dadurch dringt der Dampf oder das Kondensat nicht in den kompletten Porenanteil im Holz ein und die Wärmeübertragung wird verzögert. Die hohe Ausgangs-Holzfeuchte der wassergelagerten Fichtenholz-Hackschnitzel in Abbildung 7.11c trägt vermutlich durch freies Wasser im kapillar-porösen System auch zur Verzögerung bei der Massenzunahme bei. Das Phänomen wird anhand der Ergebnisse in Abschnitt 7.2.4 weiter diskutiert.

Bei dem bisher erarbeiteten Erkenntnisgewinn ist zu beachten, dass keine Korrektur für den **Mas-**

Abbildung 7.11: Vergleich der, aus den Versuchsergebnissen berechneten, theoretisch benötigten Dampfmenge zur Erwärmung der Hackschnitzel, mit der gemessenen Massenzunahme der Hackschnitzel infolge von Absorption von Dampf. **a**, Buchenholz-Hackschnitzel, Ausgangsholzfeuchte 48 %, Einwaage 300 g, n=5. **b**, Fichtenholz-Hackschnitzel, Ausgangsholzfeuchte 76 %, Einwaage 300 g, n=5. **c**, Fichtenholz-Hackschnitzel, wassergelagert, Ausgangsholzfeuchte 135 %, Einwaage 400 g, n=5.

senverlust infolge thermischer Zersetzung oder Abgabe flüchtiger organischer Verbindungen erfolgte, wie in Fengel (1966) oder Košík et al. (1968) beschrieben. Während die amorphen, quellbaren Bereiche der Zellulose in dem untersuchten Temperaturbereich relativ unverändert bleiben sollten, ist der Massenverlust hauptsächlich durch den Abbau von Hemizellulose bedingt (Sander mann & Augustin 1964; Gellerstedt 2009, S. 50). Dieses Phänomen tritt bei hoher Temperatur in Verbindung mit hoher Holzfeuchte verstärkt auf und kann zur Reduzierung der Sorptionsfähigkeit im TMP-Verfahren beitragen (Lenth & Kamke 2001). Die Effekte können grundsätzlich zu dem degressiven Verlauf der Massenzunahme ab ca. 3 bar Sattedampfdruck beitragen (Engelhardt 1979; Ishikawa et al. 2004).

Unter inerten Bedingungen beträgt der Massenverlust nach Košík et al. (1968) bei der Holzart Buche (*Fagus sylvatica*) infolge einer Temperatursteigerungsrate von 5 °C in der Minute ca. 8 % bei 150 °C und ca. 10 % bei 200 °C. Für die Holzart Fichte (*Picea abies*) wurde von Fengel (1966)

ein Massenverlust infolge einer Heizzeit von 24 h von ca. 2 % bei 120 °C, ca. 7 % bei 150 °C und ca. 15 % bei 200 °C festgestellt. Der Massenverlust steigt bei beiden Holzarten mit zunehmender Temperatur exponentiell an.

Im TMP-Verfahren mit einer Sattdampfatemperatur von 183 °C liegt der Massenverlust bei der Holzart Kiefer nach 2 min bei ca. 6 %, nach 4 min bei ca. 9 % und nach 6 min bei ca. 11 % (Asplund 1949). Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Holzart Kiefer den höchsten Extraktstoffgehalt unter den einheimischen Holzarten aufweist (Björklund & Nilvebrant 2009). Aktuellere Untersuchungen durch Ishikawa et al. (2004) am Kernholz der Sichelanne (*Cryptomeria japonica*) in Sattdampfatemosphäre ergaben Massenverluste von ca. 0 % bei 120 °C, ca. 2 % bei 140 °C und ca. 5 % bei 160 °C bei einer Verweilzeit von 1 h. Kernholz enthält generell einen höheren Anteil an Extraktstoffen als das Splintholz (Hillis 1971). Die **Ausbeuteverluste** liegen aufgrund der thermischen Beanspruchung des Holzes im RMP-Verfahren zwischen 4 % und 6 % sowie im TMP-Verfahren zwischen 6 % und 9 % (Belgacem & Pizzi 2016, S. 173).

Aus der ermittelten Massenzunahme wird die **gemessene Holzfeuchte** u_g ohne thermische Massenverluste oder reduzierte Sorptionsfähigkeit nach Gleichung 7.5 berechnet.

$$u_g = \frac{m_s - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (7.5)$$

u_g gemessene Holzfeuchte in Sattdampfatemosphäre in %
 m_s Feuchte Masse der Hackschnitzel in Sattdampfatemosphäre
 m_0 Trockenmasse der Hackschnitzel

Aus der Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 7.12 wird deutlich, dass die Massenzunahme durch Wasserdampf-Absorption eine Zunahme der gemessenen Holzfeuchte mit steigendem Sattdampfdruck mit sich bringt. Bemerkenswert ist, dass die wassergelagerten Fichtenholz-Hackschnitzel mit einer Ausgangs-Holzfeuchte von 135 % eine Erhöhung der gemessenen Holzfeuchte um ca. 40 % aufweisen. Der kondensierte Wasserdampf führt hier zu einer Holzfeuchte oberhalb der maximalen Wassersättigung (Stamm 1964b, S. 145, 153–154). Die Fichten- und Buchenholz-Hackschnitzel mit niedrigerer Ausgangs-Holzfeuchte nähern sich mit steigendem Sattdampfdruck der maximalen Wassersättigung an.

Die Hackschnitzel mit geringerer Ausgangs-Holzfeuchte erreichen in der Sattdampfatemosphäre nach 6 min nicht das Niveau der wassergelagerten Fichtenholz-Hackschnitzel. Ob es sich bei der Massenzunahme, beziehungsweise der Steigerung der gemessenen Holzfeuchte lediglich um Oberflächen-Kondensation handelt, kann anhand der Beobachtung in Abbildung 7.13 diskutiert werden. Die hier dargestellte relative Änderung der gemessenen Holzfeuchte u_r (ohne thermische Massenverluste oder reduzierte Sorptionsfähigkeit) wurde folgenderweise berechnet:

$$u_r = \frac{u_s}{u_i}$$

u_r relative Holzfeuchteänderung in %
 u_g gemessene Holzfeuchte in Sattdampfatemosphäre
 u_i Ausgangs-Holzfeuchte

Die relative Holzfeuchteänderung stellt das Verhältnis der gemessenen Holzfeuchte in Sattdampfatemosphäre u_s und der Ausgangs-Holzfeuchte der Hackschnitzel u_i dar. Daraus folgt, dass die Hackschnitzel mit geringerer Ausgangs-Holzfeuchte im Verhältnis mehr Wasserdampf absorbieren, als die Hackschnitzel mit höherer Ausgangs-Holzfeuchte. Das bereits in den Hackschnitzeln enthaltene Wasser begrenzt somit die Wasseraufnahme in Form der Differenz zwischen

Abbildung 7.12: Änderung der gemessenen Holzfeuchte unter Variation des Sattdampfdrucks. Untersuchung der Wasserdampf-Absorption von Buchen- und Fichtenholz-Hackschnitzeln mit unterschiedlicher Ausgangs-Holzfeuchte. Die Druckstufen wurden unabhängig voneinander untersucht. Dauer: 6 min, n=5.

Ausgangs-Holzfeuchte und gemessener Holzfeuchte in Sattdampfatmosfera. Das Phänomen der Massenzunahme kann nicht allein durch Kondensation auf der Oberfläche der Hackschnitzel, wie die Beobachtung in Abbildung 7.7a zeigt, erklärt werden. Die Massenzunahme muss auch durch Kondensation und Transport von Wasser im inneren der Hackschnitzel stattfinden, denn hier begrenzt die vorhandene Holzfeuchte die Massenzunahme. Es handelt sich deshalb bei dem untersuchten Phänomen um **Absorption** in Abgrenzung zu Adsorption im hygroskopischen Bereich der Holzfeuchte.

Hartler (1977) zufolge eignen sich auch Hackschnitzel mit einer Holzfeuchte unterhalb des Fasersättigungsbereichs für die Herstellung von Holzstoffen für die Papierherstellung im TMP-Verfahren. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Hackschnitzel vor dem Kontakt mit den Mahlscheiben wassergesättigt sind.

Abbildung 7.13: Relative Holzfeuchteänderung von Buchen- und Fichtenholz hackschnitzeln mit unterschiedlicher Ausgangs-Holzfeuchte im Verhältnis zur gemessenen Holzfeuchte unter Variation des Sattdampfdrucks. Die Druckstufen wurden unabhängig voneinander untersucht. Dauer: 6 min, $n=5$.

Die **in situ** Konsistenz der Hackschnitzel ist in Tabelle 7.5 aufgelistet. Auffällig ist die hohe Konsistenz der Fichten- und insbesondere der Buchenholz-Hackschnitzel mit niedriger Ausgangs-Holzfeuchte. Lediglich die wassergelagerten Fichtenholz-Hackschnitzel liegen im Bereich der von Kerekes (2015) bezüglich des RMP- und TMP-Verfahrens der Papierherstellung angegebenen Konsistenz von ca. 30 %. Über den Einfluss einer hohen Konsistenz auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme sind keine Veröffentlichungen bekannt. Auch die daraus resultierende Beschaffenheit der Faserstoffe sowie deren Eignung für die Herstellung von Holzwerkstoffen wurde bisher nicht untersucht.

Tabelle 7.5: Konsistenz der Hackschnitzel in Abhängigkeit des Sattdampfdrucks. Dauer 6 min, $n=5$.

Sattdampf- druck	Konsistenz					
	Buche		Fichte		Fichte, wassergelagert	
bar	$\bar{x}$ %	σ %	$\bar{x}$ %	σ %	$\bar{x}$ %	σ %
1	60	1,4	50	0,8	39	0,7
2	57	1,0	48	1,0	38	1,0
3	56	1,1	47	1,5	37	1,2
4	55	1,3	46	1,2	37	0,9
5	55	1,4	46	0,8	36	1,3
6	55	1,0	45	1,1	36	1,4
7	53	0,6	45	1,6	36	0,9
8	53	1,1	44	1,3	35	1,1
9	51	0,4	43	0,8	35	0,5

Zur *in situ* Feuchtemessung von Hackschnitzeln in Sattdampf-atmosphäre wurden im Rahmen des Promotionsvorhabens außerdem Untersuchungen mit der Methode der **Near-Infrared-**

Spektroskopie (NIR-Spektroskopie) durchgeführt. Im NIR-Spektrum ist über die Änderung der Absorptionsintensitäten und Verschiebung der Peakbande von Wasser der Wassergehalt des reflektierenden Materials messbar (Ding et al. 2005). Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen wurden von den an den Untersuchungen beteiligten Unternehmen nicht zur Veröffentlichung freigegeben.

7.2.3 Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks

Der Begriff Desorption ist im Zusammenhang mit der Ausgleichs-Holzfeuchte im hygroskopischen Bereich unter atmosphärischen Bedingungen und relativer Luftfeuchte definiert als die Umkehr der Adsorption (Stamm 1964c, S. 133). In dem vorliegenden Fall wird der Begriff Desorption allgemeiner verwendet, um das Verdampfen von freiem und gebundenem Wasser aus den Hackschnitzeln und Faserstoffen zu beschreiben. Schließlich ist nicht geklärt, wie der Sattdampfdruck und erhöhte Temperaturen die Ausgleichs-Holzfeuchte beeinflussen. In Stamm (1964c, S. 152–154) finden sich Hinweise darauf, dass die Ausgleichs-Holzfeuchte durch thermische Beanspruchung höher liegen kann.

Die gemessene Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks u_d wurde nach Gleichung 7.6 ohne thermische Massenverluste oder reduzierte Sorptionsfähigkeit berechnet. Auf die Faserstoffherzeugung folgt im TMP- und RMP-Verfahren folgt der Prozessschritt der Trocknung. Dabei nimmt der Sattdampfdruck nach dem Refiner über die Blowline in den Stromrohtrockner bis auf den atmosphärischen Druck ab. Die Desorption von Wasser nach Entspannung des Sattdampfdrucks ist deshalb auch bezüglich des thermischen Energiebedarfs in der Faserstoff-Trocknung von Interesse.

$$u_d = \frac{m_{d,0}}{m_0} \cdot 100 \quad (7.6)$$

u_d	Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks %
m_d	Feuchte Masse nach Entspannung des Sattdampfdrucks
m_0	Trockenmasse

Hierbei ist festzuhalten, dass die **Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks** unabhängig von der Höhe des Sattdampfdrucks vor der Entspannung ist, wie Abbildung 7.14 veranschaulicht. Dies kann daran festgemacht werden, dass die gemessene Holzfeuchte über alle Druckstufen im Rahmen der Messungenauigkeit die selben Werte annimmt. Die gemessene Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks liegt dabei deutlich höher als die Ausgangs-Holzfeuchte der Hackschnitzel. Das von den Hackschnitzeln absorbierte Wasser verdampft folglich nicht wieder vollständig. Dieser Effekt könnte mit der thermischen Behandlung der Hackschnitzel in der Sattdampfatmosfera zusammenhängen. Der steile Anstieg der Sorptionsisothermen der Ausgleichsfeuchte bei hohem relativem Dampfdruck (rel. Luftfeuchte) deutet darauf hin, dass die Ultrastruktur des Holzes hierbei für die Wasserdampfadsorption zugänglicher wird. Der thermische Einfluss des Sattdampfs kann diesen Effekt verstärken, indem beispielsweise Hemizellulosen abgebaut und Hydroxylgruppen frei werden.

Weiterhin kann die Beobachtung aus Abbildung 7.6 c, dass die Holzfeuchte der Hackschnitzel vor dem Aufschluss einen maßgeblichen Effekt auf die Holzfeuchte der Fasern nach dem Aufschluss zu haben scheint, bestätigt werden. Inwiefern die gemessene Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks mit der tatsächlichen Feuchte der Faserstoffe nach dem Aufschluss zusammenhängt bleibt offen. Diese Thematik wird in Abschnitt 7.4 weiter untersucht.

Abbildung 7.14: Gemessene Holzfeuchte infolge der Desorption von Buchen- und Fichtenholz-Hackschnitzeln mit unterschiedlicher Ausgangs-Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks. Die Druckstufen wurden unabhängig voneinander untersucht. Der Sattdampfdruck vor der Entspannung betrug: **a**, 1 bar; **b**, 2 bar; **c**, 3 bar; **d**, 4 bar; **e**, 5 bar; **f**, 6 bar; **g**, 7 bar; **h**, 8 bar; **i**, 9 bar; $n=5$.

7.2.4 Zeitlicher Verlauf der Absorption und Desorption

Aus dem in Abbildung 7.15 beispielhaft dargestellten zeitlichen Verlauf der Feuchtezunahme bei einem Sattdampfdruck von 9 bar lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten. Die Massenzunahme und -abnahme erfolgen ohne messbare Verzögerung **simultan mit dem Verlauf des Sattdampfdrucks**. Die Massenzunahme flacht ab, wenn der Solldruck das Sattdampfdrucks erreicht ist. Ab diesem Zeitpunkt absorbieren die Hackschnitzel keinen Wasserdampf mehr. Über den Zeitraum vom Erreichen des Solldrucks bis zur Entspannung des Sattdampfdrucks ist keine weitere Zu- oder Abnahme der gemessenen Holzfeuchte messbar, die nicht auf eine Druckschwankung zurückzuführen ist. Diese Druckschwankungen treten regelungs- und anlagenbedingt auf. Um die Genauigkeit der Untersuchungen zu verbessern, wäre ein kleineres Druckbehältervolumen sinnvoll. Weiterhin ist im Rahmen der Messungenauigkeit kein Massenverlust des Holzes feststellbar, der nicht durch zusätzliche Absorption ausgeglichen würde. Außerdem kann ein untergeordneter Einfluss der Kochzeit auf die Konsistenz, wie in Abbildung 7.2 c dargestellt, hiermit bestätigt werden.

Die **Erkenntnisse** sind ein Hinweis darauf, dass die Erwärmung der Hackschnitzel innerhalb weniger Sekunden erfolgt, vorausgesetzt es steht eine ausreichende Menge an Sattdampf zur Verfügung. Die Geschwindigkeit kann auch mit dem hydrostatischen Druck des Sattdampfes erklärt werden, der alle zugänglichen Volumen im Holz simultan füllt. Mit zunehmender Dicke der Hackschnitzel steigt vermutlich der Anteil der Wärmeleitung zur Erwärmung des Kerns der Hackschnitzel, da der Dampf hier nicht penetrieren kann. Die Ausgangs-Partikelgröße aus Abschnitt 7.1.2 hat vermutlich einen erheblichen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Erwärmung und damit letztendlich auch auf die Konsistenz vor dem Aufschluss.

Abbildung 7.15: Zeitlicher Verlauf der Absorption und Desorption von Hackschnitzeln in Sattedampf Atmosphäre. Zeitlicher Verlauf des Sattedampfdrucks (Sollwert 9 bar): **a**, Buchenholz-Hackschnitzel. **c**, Fichtenholz-Hackschnitzel. **e**, wassergelagerte Fichtenholz-Hackschnitzel. Zeitlicher Verlauf der Ab- und Desorption: **b**, Buchenholz-Hackschnitzel. **d**, Fichtenholz-Hackschnitzel. **f**, wassergelagerte Fichtenholz-Hackschnitzel. $n=1$.

Rückblickend auf die in diesem Kapitel gesammelten Ergebnisse, muss davon ausgegangen werden, dass die Erwärmung der Hackschnitzel in ähnlicher Geschwindigkeit erfolgt, wie die Massenzunahme. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass eine hohe Ausgangs-Holzfeuchte die Erwärmung verzögern kann. Weitere genauere und umfangreichere Untersuchungen zum Einfluss der Ausgangs-Holzfeuchte der Hackschnitzel auf die Hackschnitzelerwärmung, auf die Beschaffenheit der Faserstoffe und auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme sind notwendig.

7.3 Untersuchungen zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in der Faserstofferzeugung

7.3.1 Einleitung

Aus der Papierherstellung sind zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen zu Mahlscheiben und der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in der mechanischen Faserstofferzeugung im Zusammenhang mit Stoff- und Produkteigenschaften bekannt (u.a. Leask 1973; Miles & May 1990; Muhic et al. 2011). In der MDF-Herstellung finden **Mahlscheibentests** in Zusammenarbeit mit den Mahlscheibenherstellern statt. Eine geringe Zahl an Untersuchungen zum Einsatz von Mahlscheiben in der MDF-Herstellung ist bekannt (Börste 2008; Roll 2010a,b; Ladenburger 2010; Gao 2014). Weitere Untersuchungen zur Faserstofferzeugung für die MDF-Herstellung beschränken sich auf Untersuchungen des Einflusses der Holzart und der Aufschlussbedingungen Sattdampfdruck bzw. Temperatur, Verweilzeit und Mahlpalt auf die Beschaffenheit der Faserstoffe und die Eigenschaften der daraus hergestellten MDF (u.a. Roffael et al. 1994a; Schneider et al. 2000; Neimsuwan et al. 2008; Ayrimis et al. 2017; Benthien et al. 2014).

Im Zusammenhang mit Holzfaserdämmstoffen wurde das TMP-Verfahren bislang einmal wissenschaftlich untersucht (Brombacher 2015). Im Fokus der labortechnischen Untersuchungen standen hierbei die Auswirkungen der Holzarten Kiefer und Buche unter Variation der Aufschlussbedingungen Temperatur bzw. Sattdampfdruck, Verweilzeit und Mahlpalt auf die Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe (F. Michel et al. 2014; Brombacher et al. 2016). Das **Ziel** der vorliegenden Untersuchungen ist es deshalb, experimentell zu ermitteln, welchen Einfluss unterschiedliche Mahlscheibenmuster unter Variation der Sattdampf Temperatur und der Holzarten Buche und Fichte auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme haben. Vor dem Hintergrund der Produkt- und Prozessoptimierung und der Senkung von Herstellungskosten ist dabei die Reduzierung des elektrischen und insbesondere des thermischen Energiebedarfs von Interesse. Deshalb wurde neben dem TMP-Verfahren auch die Machbarkeit des RMP-Verfahrens untersucht.

Den Untersuchungen zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in der Faserstofferzeugung gingen eine Reihe von Vorversuchen voraus, die der **Methodenentwicklung** für den Vergleich von Mahlscheibenmustern im labortechnischen Maßstab anhand der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme dienten. Als zielführend hat sich dabei herausgestellt, dass die Parameter Verweilzeit, Holzfeuchte, Durchsatz und vor allem der Mahlpalt als fixe Parameter und die Parameter Holzart, Mahlscheibenmuster und Sattdampf Temperatur variabel untersucht werden (vgl. Abschnitt 7.1.4). Die Vorversuche machten außerdem deutlich, dass die TMP-Mahlscheibenmuster nicht für das RMP-Verfahren geeignet sind. Aus diesem Grund wurde ein spezielles Mahlscheibenmuster für das RMP-Verfahren entwickelt.

7.3.2 Spezifische elektrische Leistungsaufnahme im TMP-Verfahren

Im TMP-Verfahren wurden fünf Mahlscheibenmuster mit den Holzarten Fichte und Buche in jeweils drei Druck- bzw. Temperaturstufen untersucht. Die Prozessparameter der untersuchten Varianten sind in Tabelle 6.18 aufgelistet. Das Hauptergebnis ist das **arithmetische Mittel der SEL** aus den Wiederholungen der Aufschlussversuche. In Tabelle 7.6 ist ein Überblick über die Mittelwerte gegeben. Die ergänzend enthaltene Standardabweichung zeigt die starken Schwankungen der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme an, die im weiteren Verlauf der Ergebnisdarstellung vertiefend betrachtet werden.

Tabelle 7.6: Auflistung des arithmetischen Mittels und der Standardabweichung der ermittelten spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) im TMP-Verfahren.

Variante	Mahlscheibe	Holzart	Aufschlussbedingungen	SEL	σ
				$\bar{x}$ Wh/kg _{atro}	
1	1	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	489	176
2	1	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	261	195
3	1	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	160	141
4	1	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	315	253
5	1	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	192	116
6	1	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	158	162
7	2	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	493	416
8	2	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	139	51
9	2	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	112	57
10	2	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	150	63
11	2	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	138	62
12	2	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	97	61
13	3	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	178	82
14	3	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	124	43
15	3	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	98	47
16	3	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	142	53
17	3	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	123	51
18	3	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	75	41
19	4	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	526	453
20	4	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	282	248
21	4	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	136	121
22	4	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	218	135
23	4	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	124	61
24	4	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	101	70
25	5	Fichte	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	395	282
26	5	Fichte	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	157	121
27	5	Fichte	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	124	56
28	5	Buche	Sattdampf: 2,1 bar (135 °C)	268	140
29	5	Buche	Sattdampf: 3,8 bar (150 °C)	147	76
30	5	Buche	Sattdampf: 7,9 bar (175 °C)	104	94

* Manuelle Einstellung an der Ringskala der Mahlpaltverstellung

Abbildung 7.16: Darstellung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) aus den Wiederholungen mit dem **Mahlscheibenmuster 1**. **a, c, e**: In der linken Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Fichte aufsteigend nach der Sattdampftemperatur dargestellt. **b, d, f**: In der rechten Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Buche aufsteigend nach der Sattdampftemperatur dargestellt. *n*: Anzahl der Messpunkte, *M*: Arithmetisches Mittel der SEL.

Mahlscheibenmuster 1

Bei dem Mahlscheibenmuster 1 handelt es sich um ein **bidirektionales Design** (Tabelle 6.2). Die Drehrichtung ist nicht vorgegeben. Bei Abrundung der Stege ist es deshalb möglich die Drehrichtung zu reversieren. Dieser Mahlscheibentyp ist heute noch in der LC-Mahlung der Papierherstellung und in seltenen Fällen in der MDF- oder Holzfaserdämmstoffherstellung anzutreffen. In der Holzwerkstoffherstellung gilt dieses Design als überholt. In Abbildung 7.16 sind die einzelnen Wiederholungen der Untersuchungen mit dem Mahlscheibenmuster dargestellt. Bei der Holzart Fichte fallen die hohe Leistungsaufnahme und die Ausreißer nach unten in Abbildung 7.16a auf. Darüber hinaus sind in Abbildung 7.16c die starken Leistungsschwankungen markant, die durch die Interquartilabstände (IQR), Whisker und Ausreißer angezeigt werden. Der hohe Mittelwert von Wiederholung 1 in Abbildung 7.16e ist ebenso wie die Unterschiede in Abbildung 7.16b vermutlich auf Bedienfehler in der Einstellung des Mahlspalts zurückzuführen. Ins Auge fallen zudem die Ausreißer und die hohe Leistungsaufnahme in Abbildung 7.16b.

Abbildung 7.17: Darstellung des arithmetischen Mittelwerts der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) über der Sattdampftemperatur aus den Versuchen mit dem **Mahlscheibenmuster 1**. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche. *n*: Anzahl der Messpunkte, *M*: Arithmetisches Mittel der SEL. *N*=4, Kruskal-Wallis-Test Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *.

Der Vergleich des arithmetischen Mittels in Abbildung 7.17 zeigt den bereits beschriebenen Zusammenhang zwischen steigender Aufschlussstemperatur und abnehmender SEL. Auffällig ist bei der Sattdampftemperatur von 135 °C die deutlich geringere mittlere Leistungsaufnahme bei der Holzart Buche (Abbildung 7.17b), bei gleichzeitig deutlich ausgeprägteren Leistungsspitzen im Vergleich zur Holzart Fichte (Abbildung 7.17a). Bei der Sattdampftemperatur von 175 °C ist kein Unterschied zwischen den Holzarten festzustellen.

Abbildung 7.18: Darstellung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) aus den Wiederholungen mit dem **Mahlscheibenmuster 2**. **a, c, e**: In der linken Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Fichte aufsteigend nach der Sattedampftemperatur dargestellt. **b, d, f**: In der rechten Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Buche aufsteigend nach der Sattedampftemperatur dargestellt. *n*: Anzahl der Messpunkte, *M*: Arithmetisches Mittel der SEL.

Mahlscheibenmuster 2

Charakteristisch für den Typ 2 (Tabelle 6.3) ist die in zwei Zonen geteilte Mahlbahn und der geringe Stegwinkel von 20 ° bis 30 °. Die innere Zone verfügt über eine relativ geringe Anzahl an Stegen und die Stegbreite ist mit 4 mm vergleichsweise breit. Ebenso wie die Nutbreite, die von innen nach außen von 4 mm auf 8 mm zunimmt. Die Dämme sind in Zone 2 tangential angeordnet. Es handelt sich um ein **Spiraldesign** mit geringer Krümmung der Stege. In der Darstellung der Wiederholungen in Abbildung 7.18 ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Holzarten Fichte und Buche im Aufschluss bei einer Sattdampftemperatur von 135 °C (Abbildung 7.18a und b) sichtbar. Die großen IQR und die Whisker bis 2000 Wh/kg_{atro} in Abbildung 7.18a weisen darauf hin, dass dieses Mahlscheibenmuster nicht für die Zerfaserung von Fichte bei niedrigen Sattdampftemperaturen geeignet ist. Die weiteren Wiederholungen zeigen ein recht einheitliches Bild mit niedriger SEL.

Abbildung 7.19: Darstellung des arithmetischen Mittelwerts der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) über der Sattdampftemperatur aus den Versuchen mit dem **Mahlscheibenmuster 2**. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche. n: Anzahl der Messpunkte, M: Arithmetisches Mittel der SEL. N=4, Kruskal-Wallis-Test Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *.

Diese Beobachtungen werden auch durch den Vergleich der Mittelwerte in Abbildung 7.19 bestätigt. Hier ist wieder eine Abnahme der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme mit steigender Aufschlussstemperatur zu beobachten. Die Unterschiede zwischen den Temperaturstufen sind signifikant und belaufen sich zwischen 150 °C und 175 °C auf rund 20 % bei der Holzart Fichte und auf rund 30 % bei der Holzart Buche. Zwischen 135 °C und 150 °C besteht ein Unterschied von rund 8 % bei der Holzart Buche. Die ermittelte spezifische elektrische Leistungsaufnahme bei 175 °C liegt am unteren Ende der typischerweise in der MDF-Herstellung auftretenden Werte (Gao 2014).

Abbildung 7.20: Darstellung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) aus den Wiederholungen mit dem **Mahlscheibenmuster 3**. **a, c, e**: In der linken Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Fichte aufsteigend nach der Sattedampftemperatur dargestellt. **b, d, f**: In der rechten Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Buche aufsteigend nach der Sattedampftemperatur dargestellt. *n*: Anzahl der Messpunkte, *M*: Arithmetisches Mittel der SEL.

Mahlscheibenmuster 3

Das Mahlscheibenmuster 3 (Tabelle 6.4) zeichnet sich durch drei Zonen mit einer zur Peripherie hin steigenden Anzahl an Stegen aus. Charakteristisch ist die **umlaufende Unterbrechung der Stege** zwischen den Zonen 1 und 2 sowie den Zonen 2 und 3. Ein weiteres Merkmal ist die hohe Anzahl an Vorbrechern, welche zudem am Übergang zur inneren Zone relativ breit ausgeführt sind. Dämme unterhalb der Steghöhe sind nicht vorhanden. In der äußeren Zone 3 sind Dämme tangential angeordnet. Es handelt sich, wie beim Mahlscheibenmuster 2, um ein Spiraldesign, allerdings mit steilerem Stegwinkel. In der Betrachtung der Wiederholungen, dargestellt in Abbildung 7.20 fällt das recht einheitliche Verhalten in allen Temperaturstufen und bei beiden Holzarten auf. Im Vergleich zu den bereits beschriebenen Mahlscheibenmustern kann festgehalten werden, dass die Leistungsspitzen und -schwankungen geringer ausfallen. Die höhere spezifische elektrische Leistungsaufnahme der Wiederholung 1 in Abbildung 7.20f (Buche 175 °C) zeigt die Herausforderung in der Versuchsdurchführung auf. Wird der Mahlspalt (unabsichtlich) geringfügig enger eingestellt steigt die spezifische elektrische Leistungsaufnahme an.

Abbildung 7.21: Darstellung des arithmetischen Mittelwerts der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) über der Sattdampftemperatur aus den Versuchen mit dem **Mahlscheibenmuster 3**. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche. n: Anzahl der Messpunkte, M: Arithmetisches Mittel der SEL. N=4, Kruskal-Wallis-Test Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *.

Der Vergleich des arithmetischen Mittelwerts in Abbildung 7.21 ergab weitere Erkenntnisse. Es zeigt sich, dass die Zerfaserung von Fichtenholz bei 135 °C rund 20 % mehr elektrische Energie erfordert, als die Faserstofferzeugung mit der Holzart Buche. Bei einer Sattdampftemperatur von 150 °C ist kein Unterschied festzustellen. Und bei 175 °C liegt die Zerfaserungsleistung mit der Holzart Buche rund 24 % unter der mit der Holzart Fichte. Hervorzuheben ist die niedrige spezifische elektrische Leistungsaufnahme in der Faserstofferzeugung mit der Holzart Buche bei einer Sattdampftemperatur von 175 °C.

Abbildung 7.22: Darstellung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) aus den Wiederholungen mit dem **Mahlscheibenmuster 4**. **a, c, e**: In der linken Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Fichte aufsteigend nach der Sattdampftemperatur dargestellt. **b, d, f**: In der rechten Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Buche aufsteigend nach der Sattdampftemperatur dargestellt. *n*: Anzahl der Messpunkte, *M*: Arithmetisches Mittel der SEL.

Mahlscheibenmuster 4

Bei dem Mahlscheibenmuster 4 (Tabelle 6.5) handelt es sich um ein Design, das dem **Stand der Technik in der MDF-Herstellung** entspricht. Das Mahlscheibenmuster wurde vom industriellen Maßstab in den Labormaßstab verkleinert. Die Stege sind spiralförmig angeordnet, wobei die Krümmung leicht in Rotationsrichtung zeigt. Die Anzahl der Stege nimmt zur Peripherie hin zu und der Stegwinkel nimmt gleichzeitig ab. In den Nuten sind drei U-Dämme und ein Damm in der Peripherie ebenfalls spiralförmig entgegen der Rotationsrichtung angeordnet. In Abbildung 7.22e,f wird sichtbar, dass die Mahlscheibe im für MDF üblichen hohen Temperaturbereich eine relativ geringe spezifische elektrische Leistungsaufnahme erzielt. Die hohen Ausreißer der Wiederholungen 3 respektive 4 sind auffällig. Bei niedrigeren Temperaturen sind dagegen starke Leistungsschwankungen sichtbar. Die Leistungsspitzen liegen bei 135 °C (Abbildung 7.22a) zwischen 2000 und 3000 Wh/kg_{atro} (!). Mit der Holzart Buche zeigt das Mahlscheibenmuster eine relativ gleichmäßige SEL.

Abbildung 7.23: Darstellung des arithmetischen Mittelwerts der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) über der Sattdampftemperatur aus den Versuchen mit dem **Mahlscheibenmuster 4**. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche. n: Anzahl der Messpunkte, M: Arithmetisches Mittel der SEL. N=4, Kruskal-Wallis-Test Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *.

Der Vergleich der arithmetischen Mittelwerte der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in Abbildung 7.23 bestätigt die oben beschriebenen Beobachtungen. Das Mahlscheibenmuster scheint für niedrigere Sattdampftemperaturen mit der Holzart Fichte nicht geeignet zu sein. Darüber hinaus ist die Temperaturabhängigkeit bei der Holzart Fichte stark ausgeprägt. Auch bei der Holzart Buche sind die Unterschiede zwischen den Sattdampftemperaturen vergleichsweise stark ausgeprägt. Die Werte bei 175 °C mit Fichte sind mit den Werten von Gao (2014) aus der industriellen MDF-Produktion vergleichbar.

Abbildung 7.24: Darstellung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) aus den Wiederholungen mit dem **Mahlscheibenmuster 5**. **a, c, e**: In der linken Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Fichte aufsteigend nach der Sattdampftemperatur dargestellt. **b, d, f**: In der rechten Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Buche aufsteigend nach der Sattdampftemperatur dargestellt. *n*: Anzahl der Messpunkte, *M*: Arithmetisches Mittel der SEL.

Mahlscheibenmuster 5

Das Mahlscheibenmuster 5 (Tabelle 6.6 und Tabelle 6.7) ist eine Weiterentwicklung des Mahlscheibenmusters 4. Es zeichnet sich durch einen unterschiedlich gestalteten Rotor und Stator aus. Die Stege des Rotors sind stark entgegen der Laufrichtung gekrümmt. An der Peripherie liegt die Steganzahl gegenüber den anderen untersuchten Mahlscheibenmustern deutlich höher. Die Krümmung auf dem Stator ist der Krümmung auf dem Rotor entgegengesetzt. Gleichzeitig ist die Steganzahl auf dem Stator reduziert. Im eingebauten Zustand zeigen die Stege von Rotor und Stator in dieselbe Richtung. Das Mahlscheibenmuster wurde speziell **für die Holzfaserdämmstoffherstellung entwickelt**. In Abbildung 7.24 zeigen die Wiederholungen innerhalb der Holzarten ein relativ einheitliches Bild. Ein Erklärungsansatz für die Ausreißer der Wiederholung 2 in Abbildung 7.24c und Wiederholung 2 in Abbildung 7.24f sind Schwankungen in der Größenverteilung oder eine Verunreinigung der Hackschnitzel. Möglicherweise sind die Leistungsspitzen auch auf Resonanzen der Laborrefineranlage zurückzuführen.

Abbildung 7.25: Darstellung des arithmetischen Mittelwerts der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) über der Sattdampftemperatur aus den Versuchen mit dem **Mahlscheibenmuster 5**. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche. n: Anzahl der Messpunkte, M: Arithmetisches Mittel der SEL. N=4, Kruskal-Wallis-Test Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *.

Die arithmetischen Mittelwerte der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in Abbildung 7.25 zeigen eine vergleichsweise starke Temperaturabhängigkeit. Zwischen 135 °C und 150 °C besteht bei der Holzart Fichte ein Unterschied von rund 60 % und bei der Holzart Buche von rund 55 %. Die Temperaturabhängigkeit geht zwischen 150 °C und 175 °C auf rund 21 % bei der Holzart Fichte und auf rund 29 % bei der Holzart Buche zurück. Besonders laufruhig zeigt sich die Faserstoffherzeugung mit der Holzart Fichte bei 175 °C.

Abbildung 7.26: Vergleich der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) in der Faserstoffherzeugung mit der **Holzart Fichte** innerhalb der Aufschlusstemperaturen: **a**, 135 °C; **b**, 150 °C; **c**, 175 °C. n: Anzahl der Messpunkte, M: Arithmetisches Mittel der SEL.

Tabelle 7.7: Statistische Auswertung in Ergänzung zu Abbildung 7.26 (Faserstoffherzeugung mit der **Holzart Fichte**). Die Asteriske indizieren das Signifikanzniveau.

	135 °C				150 °C				175 °C			
M.	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2	****				****				****			
3	****	****			****	****			****	****		
4	ns	ns	****		****	****	****		****	****	****	
5	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****

Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *; > 0,05 ns (nicht signifikant)
M. = Mahlscheibenmuster

Vergleich der Mahlscheibenmuster

In Abbildung 7.26 und in Abbildung 7.27 sind die Ergebnisse zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme der untersuchten Mahlscheibenmuster vergleichend innerhalb der Temperaturstufen dargestellt. Aus der Betrachtung der Darstellungen geht hervor, dass die verschiedenen Mahlscheibenmuster grundsätzlich charakteristische Unterschiede in der Faserstoffherzeugung zeigen.

In Abbildung 7.26a wird deutlich, dass mit der **Holzart Fichte** in der Satttdampftherperatur von 135 °C im Vergleich zu den anderen Aufschlusstemperaturen die höchste spezifische elektrische Leistungsaufnahme sowie die größten Schwankungen und Leistungsspitzen auftreten. Ein Erklärungsansatz hierfür wäre das Erweichungsverhalten des Fichtenholzes. Den Untersuchungen von Asplund (1940a) und Krug (2010) zufolge, führt das Erweichungsverhalten im TMP-Verfahren erst ab Aufschlusstemperaturen von über 170 °C zu einem deutlichen Rückgang der SEL. Im vorliegenden Fall muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Konstruktion der Mahlscheibe ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme hat. So zeigt das Mahlscheibenmuster 2 zwar eine hohe SEL, aber eine relativ geringe Streuung. Das Mahlscheibenmuster 3 weist hingegen eine vergleichsweise sehr geringe spezifische elektrische Leistungsaufnahme und Streuung auf. Die Ergebnisse werden vor dem Hintergrund des **Erweichungsverhaltens** von Holz in Abschnitt 7.4.2 ausführlicher betrachtet. Negativ fällt in Abbildung 7.26a das Mahlscheibenmuster 4 mit der insgesamt höchsten ermittelten spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme und den höchsten Ausreißern auf. Die für einen direkten Vergleich ungünstige Skalierung Ordinate ist dieser Tatsache geschuldet. Mit steigender Aufschlusstemperatur werden die Unterschiede zwischen den Mahlscheibenmustern geringer. Es bleibt aber festzuhalten, dass mit den Mahlscheibenmustern 2 und 3 in den Aufschlusstemperaturen 150 °C und 175 °C die niedrigste spezifische elektrische Leistungsaufnahme ermittelt wurde. Das Mahlscheibenmuster 4 scheint ebenfalls wie das Mahlscheibenmuster 5 bei hohen Satttdampftherperaturen besser zu funktionieren. Das bidirektionale Mahlscheibenmuster 1 weist die höchste spezifische elektrische Leistungsaufnahme bei 175 °C auf.

Bezüglich der **Holzart Buche** liegt die spezifische elektrische Leistungsaufnahme allgemein niedriger als bei der Faserstoffherzeugung mit der Holzart Fichte. Die Unterschiede zwischen den Mahlscheibenmustern bezüglich der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme fallen geringer aus und auch die IQR zeigen ein gleichmäßigeres Bild. Hier ist ebenfalls das Mahlscheibenmuster 3 hervorzuheben, mit dem in allen drei Temperaturstufen die niedrigste spezifische elektrische Leistungsaufnahme und die geringste Leistungsschwankung ermittelt werden konnte. Mit dieser Mahlscheibe konnte insgesamt die geringste spezifische elektrische Leistungsaufnahme mit einer

Aufschlussstemperatur von 175 °C erzielt werden. Das bidirektionale Mahlscheibenmuster 1 weist bei der Holzart Buche die höchste spezifische elektrische Leistungsaufnahme und die größten Leistungsspitzen auf.

a

b

c

Mahlscheibenmuster

Abbildung 7.27: Vergleich der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) in der Faserstoffherzeugung mit der Holzart Buche innerhalb der Aufschlussstemperaturen: **a**, 135 °C; **b**, 150 °C; **c**, 175 °C. n: Anzahl der Messpunkte, M: Arithmetisches Mittel der SEL.

Tabelle 7.8: Statistische Auswertung in Ergänzung zu Abbildung 7.27 (Faserstoffherzeugung mit der **Holzart Fichte**). Die Asteriske indizieren das Signifikanzniveau.

	135 °C				150 °C				175 °C			
M.	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2	****				****				****			
3	****	****			****	****			****	****		
4	****	****	****		****	****	**		****	**	****	
5	ns	****	****	****	****	***	****	****	****	ns	****	ns

Signifikanz: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *; > 0,05 ns (nicht signifikant)
M. = Mahlscheibenmuster

In der **statistischen Auswertung** des Mahlscheibenvergleichs mit der Holzart Fichte in Tabelle 7.7 wurden zwei Mahlscheiben-Paarungen (1-4 und 2-4) identifiziert, bei denen keine signifikanten Differenzen zwischen den zentralen Tendenzen der Grundgesamtheit bestehen. In Tabelle 7.8 besteht bezüglich der Holzart Buche eine nicht signifikante Paarung in der Temperaturstufe 135 °C (1-5) und zwei Paarungen in der Temperaturstufe 175 °C (2-5 und 4-5). Dies ist insofern bemerkenswert, als dass der Stichprobenumfang sehr hoch ist. Hier stellt sich die Frage, ob die Beschaffenheit der erzeugten Faserstoffe Unterschiede aufweist.

Das Design des Mahlscheibenmusters 3 unterscheidet sich von den anderen untersuchten Mahlscheiben, durch die umlaufende Unterbrechung der Stege zwischen den Zonen auf der Mahlbahn (Tabelle 6.4). Zudem besitzt das Muster relativ viele Vorbrecher. Ein Erklärungsansatz für die geringe spezifische elektrische Leistungsaufnahme und die Laufruhe ist, dass die umlaufende Unterbrechung der Bildung einer **Stagnationszone bzw. eines Temperaturmaximums** auf der Mahlbahn entgegenwirken. Attack et al. (1989) zeigten an einem bidirektionalem Mahlscheibenmuster im TMP-Verfahren der Papierherstellung, dass mit einer umlaufenden Unterbrechung der Stege im Bereich des Temperaturmaximums die Faserstoffqualität bei gleicher spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme verbessert wird. Darüber hinaus trug diese Spezifikation dazu bei, die Schwankungen und Leistungsspitzen insbesondere unter hoher Last zu reduzieren. Dadurch konnte der Durchsatz erhöht werden.

Das Phänomen des Temperaturmaximums wird u.a. von Attack et al. (1984), Miles & May (1990) und Roll (2010a,b) beschrieben und konnte bei industriellen Mahlscheibentests im Rahmen der vorliegenden Arbeit ebenfalls beobachtet werden (Abbildung 7.28). Die Bedeutung des **Temperaturprofils auf der Mahlbahn** wird auch von Fredrikson & Paltakari (2020) für das TMP-Verfahren der Papierherstellung beschrieben. Demnach hat der Mahlsplatt einen geringen bis keinen Einfluss auf das Temperaturprofil der Mahlbahn. Den Widerstand für den Dampfstrom bewirken hauptsächlich die Mahlscheiben. Eine Temperaturmessung im Mahlsplatt kann nach Fredrikson & Paltakari (2020) zur Prozesskontrolle eingesetzt werden. In den vorliegenden Ergebnissen wurde die Ausbildung des Temperaturmaximums nicht weiter untersucht. Beim Wechsel der Mahlscheiben wurde jedoch festgestellt, dass die Ausbildung des typischen dunkel gefärbten Rings auf der Mahlbahn bei dem Mahlscheibenmuster 12XA803 deutlich geringer ausfällt.

Abbildung 7.28: Aufnahme der Mahlbahn nach einem Mahlscheibentest im industriellen Maßstab. Es handelt sich um eine Variante des Mahlscheibenmusters 2. Zu sehen ist ein dunkel gefärbter Ring etwa in der Mitte der Mahlbahn. Die dunkle Färbung lässt auf ein Temperaturmaximum in diesem Bereich schließen, welches eine Karbonisierung des Faserstoffs hervorruft.

Mit dem **labortechnischen Batch-Verfahren** waren die Zeiträume für die Datenerfassung in der Faserstoffherzeugung auf ca. 5 min mit einem durchgesetzten Hackschnitzelvolumen von ca. 20 l Hackschnitzelvolumen begrenzt. Vor diesem Hintergrund muss die Aussagekraft der Untersuchungen diskutiert werden. Ein Verschleiß der Mahlscheiben, wie er nach hunderten von Betriebsstunden auftritt, konnte nicht untersucht werden. Wie in Gao (2014) beschrieben, bleibt die Faserqualität allerdings auch nach vielen Betriebsstunden vergleichbar. Ebenda zufolge ist die Entwicklung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme über die Zeit vom Mahlscheibenmuster abhängig. Insofern sind die Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit untereinander vergleichbar, da die Mahlscheiben aus den gleichen Legierung bestanden und in dem selben Verschleißzustand untersucht wurden. Darüber hinaus wurde der Mahlpalt in allen Versuchen gleich gehalten. Leistungsschwankungen und Leistungsspitzen treten auch im **Betrieb industrieller Refiner** auf (Eriksen et al. 2006). Interessant ist die Beobachtung, dass mit dem Mahlscheibendesign hierauf Einfluss genommen werden kann. Aus den vorliegenden Untersuchungen sind in diesem Kontext die Mahlscheibenmuster 2 und 3 in allen Temperaturbereichen und bei beiden Holzarten und das Muster 5 bei der Holzart Fichte und der Satttdampftemperatur 175 °C erwähnenswert.

In Abschnitt 7.1.3 wurde der Mahlpalt als Haupteffekt auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme identifiziert. Die geringe **Wiederholgenauigkeit** in den Untersuchungen zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme ist auf eine fehlerbehaftete Einstellung des Mahlpalts zurückzuführen. Anscheinend unterliegt der Mahlpalt im labortechnischen Batch-Verfahren trotz genauer manueller Einstellung an der Ringskala gewissen Schwankungen. Diese können auch durch die thermische Längenänderung der Refinerantriebswelle bedingt sein. Ähnliche Beobachtungen machten Wenderdel et al. (2016a, S. 8). Weiterhin sind Schwankungen in der Holzfeuchte, Größenverteilung und Schüttdichte der Hackschnitzel nicht auszuschließen.

7.3.3 Spezifische elektrische Leistungsaufnahme im RMP-Verfahren

Im RMP-Verfahren wurde die Machbarkeit einer **Faserstoffherzeugung unter Atmosphärendruck** für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen untersucht. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass gegenüber dem TMP-Verfahren Einsparungen im thermischen Energiebedarf zu erwarten sind. Durch Verzicht auf die Erwärmung der Hackschnitzel in Satttdampfdruck wird der Dampfbedarf reduziert und es erfolgt kein Anstieg der Holzfeuchte im Kocher (vgl. Abschnitt 7.2.2). Es ist weiterhin zu erwarten, dass die Wärmeentwicklung zwischen den Mahlscheiben einen Trocknungseffekt auf die Faserstoffe hat und somit die Trocknerbeladung reduziert wird. Kerekes (2015) beziffert den Energiebedarf für das RMP-Verfahren in der Papierherstellung auf 6,4 GJ/t im Vergleich zu 7,0 GJ/t für die Faserstoffherzeugung im TMP-Verfahren.

Die Versuche im RMP-Verfahren wurden in zwei Temperaturstufen unter Atmosphärendruck durchgeführt. Die Ergebnisse zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme sind in Tabelle 7.9 aufgelistet. Hier wird ein deutlicher Unterschied zwischen den Holzarten Fichte und Buche sichtbar, auf den im Folgenden näher eingegangen wird.

Tabelle 7.9: Auflistung des arithmetischen Mittels und der Standardabweichung der ermittelten spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) im RMP-Verfahren.

Variante	Mahlscheibe	Holzart	Aufschlussbedingungen	SEL	
				$\bar{x}$ Wh/kg _{gatro}	σ Wh/kg _{gatro}
1	6	Fichte	Atmosphärendruck: 20 °C	520	286
2	6	Fichte	Atmosphärendruck: 100 °C **	465	303
3	6	Buche	Atmosphärendruck: 20 °C	219	82
4	6	Buche	Atmosphärendruck: 100 °C **	215	113

* Manuelle Einstellung an der Ringskala der Laborrefineranlage

** Die Erwärmung erfolgte mit Satttdampf unter Atmosphärendruck

Mahlscheibenmuster 6

Für die Zerkleinerung nach dem RMP-Verfahren wurde das Mahlscheibenmuster 6 (Tabelle 6.8) untersucht, das speziell für das RMP-Verfahren entwickelt wurde. Das Mahlscheibenmuster unterscheidet sich insbesondere durch hohe Stege und zur Peripherie hin breiter werdende Nuten von den TMP-Mahlscheibenmustern. Es handelt sich grundsätzlich um ein **für das RMP-Verfahren entwickeltes Spiraldesign**. Der Stegwinkel nimmt zur Peripherie hin auf bis zu 45 ° zu. Dies begünstigt den Materialtransport durch den Mahlschlitz und verkürzt dadurch die Beanspruchungszeit auf der Mahlbank. Bereits Leask (1987, 93 ff.) weist darauf hin, dass Mahlscheiben für das TMP-Verfahren nicht für das RMP-Verfahren geeignet sind und umgekehrt. Vorversuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit zeigten, dass mit TMP-Mahlscheibenmustern der Durchsatz im RMP-Verfahren stark reduziert war. Eine zentrale Anforderung in der Entwicklung war deshalb die Vorgabe, den selben Durchsatz wie mit den Mahlscheibenmustern im TMP-Verfahren zu erzielen. Dieses erste Ziel wurde erreicht.

In Abbildung 7.29 zeigen die Wiederholungen mit und ohne Erwärmung der Hackschnitzel, dass die **Zerkleinerung unter Atmosphärendruck funktioniert**. Der hohe IQR und die Whisker deuten bei der Holzart Fichte auf starke Schwankungen in der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme hin. Bei der Holzart Buche treten diese Schwankungen in geringerem Maße auf. Aus Abbildung 7.30 geht hervor, dass zwischen beiden Temperaturstufen bei der Holzart Fichte ein

Abbildung 7.29: Darstellung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) aus den Wiederholungen mit dem **Mahlscheibenmuster 6**. **a, c**: In der linken Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Fichte aufsteigend nach der Sattedampftemperatur dargestellt. **b, d**: In der rechten Spalte sind die Wiederholungen mit der Holzart Buche aufsteigend nach der Sattedampftemperatur dargestellt. *n*: Anzahl der Messpunkte, *M*: Arithmetisches Mittel der SEL.

Unterschied von 11 % und bei der Holzart Buche lediglich eine geringe Signifikanz bezüglich der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme besteht. Die spezifische elektrische Leistungsaufnahme im RMP-Verfahren liegt im Vergleich zum TMP-Verfahren im Bereich der Aufschlussstemperatur von 135 °C und damit niedriger als erwartet.

Die relativ breite Streuung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme bei der Holzart Fichte kann mit den Beobachtungen in Abbildung 7.31 erklärt werden. Die Darstellung in Abbildung 7.31a zeigt starke **periodische Schwankungen** der Leistung des Hauptmotors der Laborrefineranlage. Die Schwankungen sind vermutlich auf eine ungleichmäßige Hackschnitzelzuführung durch die Einspeiseschnecke in den Mahlpalt zurückzuführen. Ähnliche Phänomene wurden

Abbildung 7.30: Darstellung des arithmetischen Mittelwerts der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) über der Sattdampf­temperatur aus den Versuchen mit dem **Mahlscheibenmuster 6**. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche. n: Anzahl der Messpunkte, M: Arithmetisches Mittel der SEL. N=4, Kruskal-Wallis-Test Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *.

bereits von Neill & Beath (1963) beschrieben und durch eine gleichmäßigere Hackschnitzelzu­führung verbessert. Der in Abbildung 7.31b dargestellte **Temperaturanstieg** im Kocher der Laborrefineranlage wird durch die Dampfentwicklung zwischen den Mahlscheiben hervorgerufen. Atack & Stationwalla (1975) stellten bei einer vergleichbaren Leistungsaufnahme eine Temperatur von 110 °C in der Peripherie der Mahlscheibe fest. Die Konsistenz der Hackschnitzel lag dabei durch die Zugabe von Verdünnungswasser mit ca. 20 % deutlich niedriger. Die Untersuchungen von Peterson et al. (1973) und Dana et al. (1975) ergaben, dass der zwischen den Mahlscheiben entstehende Dampf für die „Eigendruckbeaufschlagung“ der Hackschnitzelvorwärmung genutzt werden kann.

Bei der Holzart Buche sind die Leistungsschwankungen nicht so stark ausgeprägt wie mit der Holzart Fichte (Abbildung 7.32a). Der Temperaturanstieg ist allerdings in der selben Höhe wie bei der Holzart Fichte zu beobachten (Abbildung 7.32b).

Die Faserstofferzeugung im RMP-Verfahren war anspruchsvoll, da die Auslegung der Laborrefine­ranlage zwar den Betrieb im RMP-Verfahren ermöglicht, aber insbesondere die Hackschnitzelbe­handlung und -zuführung auf das TMP-Verfahren ausgelegt ist. **Weitere Untersuchungen sind notwendig**, um die Faserstofferzeugung im RMP-Verfahren mit angepassten Anlagenkompo­nenten und weiterentwickelten Mahlscheiben zu optimieren (Holzer et al. 1962). Prinzipiell ist es möglich, den Schwierigkeiten mit einer zweiten Zerfaserungsstufe zu begegnen, wie von Pearson (1990) vorgeschlagen. Demzufolge soll die spezifische elektrische Leistungsaufnahme um 6 % reduziert und die Standzeit der Mahlscheiben um 30 % erhöht werden. Es sind auch Kombinationen von Erwärmung unter Sattdampfdruck und Zerfaserung unter Atmosphärendruck durch Peterson et al. (1973) erfolgreich untersucht worden. Auch die Vorbehandlung mit Natriumsulfit bzw. einer Kombination von Natriumsulfit und Natriumhydroxid bei Laubhölzern wurde beispielsweise von

Abbildung 7.31: Technologische Beobachtungen in der Zerkleinerung von **Fichtenholz-Hackschnitzeln** nach dem RMP-Verfahren. **a**, Darstellung der periodischen Schwankungen der elektrischen Leistung des Hauptmotors der Laborrefineranlage. **b**, Temperaturanstieg in den Hackschnitzeln während der Zerkleinerung mit einer Ausgangstemperatur von 20 °C.

Keays & Leask (1973) untersucht und ist als CMP-Verfahren bekannt.

Abbildung 7.32: Technologische Beobachtungen in der Zerfaserung von **Buchenholz-Hackschnitzeln** nach dem RMP-Verfahren. **a**, Darstellung der periodischen Schwankungen der elektrischen Leistung. **b**, Temperaturanstieg in den Hackschnitzeln während der Zerfaserung mit einer Ausgangstemperatur von 20 °C.

7.4 Untersuchungen zum elektrischen und thermischen Energiebedarf in der Faserstoffherzeugung

7.4.1 Einleitung

In Ergänzung zu den Untersuchungen der Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattdampfatmosfera als auch der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme werden im folgenden Abschnitt weitere technologische Teilaspekte der Faserstoffherzeugung betrachtet. Die Faserstoffherzeugung für Holzwerkstoffe ist ein **energieaufwändiger Prozess**. Bezüglich der Holzfaserdämmstoff-Produktion ist durch Braun (2014) bekannt, dass die Faserstoffherzeugung einen Anteil zwischen 32 % und 44 % am elektrischen Energiebedarf der gesamten Produktion hat. Zusätzlich trägt die Dampferzeugung für das TMP-Verfahren mit 16 % bis 23 % und der Stromrohtrockner mit rund 74 % zum thermischen Energiebedarf der gesamten Produktion bei. Der Anteil der elektrischen Energie am gesamten Energiebedarf der Produktion kann folglich auf rund 10 % bis 20 % beziffert werden (Braun 2014).

Hier offenbart sich ein entscheidender Nachteil der Holzfaserdämmstoffe gegenüber den syntheti-

schen und mineralischen Wettbewerbern: Das **Erwärmen und Trocknen des Holzbestandteils Wasser** mit seiner hohen spezifischen Wärmekapazität. Der Argumentation, dass in Holzwerkstoffwerken ausreichend und quasi kostenfrei thermische Energie zur Verfügung steht, muss entgegengehalten werden, dass die Erzeugung von thermischer Energie aus Reststoffen oder Koppelprodukten Wartungs-, Instandhaltungs- und Betriebs- sowie Investitionskosten verursacht. Die Kosten für eine Kilowattstunde Dampf belaufen sich, Schätzungen aus der MDF-Produktion zufolge, auf ein Viertel bis ein Drittel der Kosten für die selbe Energieeinheit Strom. Reicht die im Werk aus eigenen Reststoffen bereitgestellte thermische Energie nicht aus, muss außerdem auf fossile Energieträger zurückgegriffen oder auch Biomasse als Brennstoff zugekauft werden. Das **Ziel** der weiteren energietechnischen Untersuchungen der Faserstofferzeugung ist es, den Stand der Wissenschaft und Technik zum Erweichungsbereich von Fichten- und Buchenholz anhand der Untersuchungen zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme aus den Mahlscheibentests zu überprüfen. Darüber hinaus ist es von wissenschaftlichem und wirtschaftlichem Interesse, die Untersuchungen zur Holzfeuchte in Sattdampfatmosfera (s. Abschnitt 7.2) mit Messungen zur Konsistenz nach der Zerfaserung in Beziehung zu dem elektrischen und thermischen Energiebedarf in der Faserstofferzeugung zu setzen.

7.4.2 Spezifische elektrische Leistungsaufnahme als Funktion der Temperatur

Die Untersuchungen von Asplund (1940a) mit Laubholz (Birke, Espe) und Nadelholz (Kiefer, Fichte) zur Abhängigkeit der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme von der Aufschlusstemperatur werden auch heute noch als Grundlage für die Prozessführung im TMP-Verfahren der Holzwerkstoffherstellung herangezogen (Wenderdel et al. 2013). Dabei sollte beachtet werden, dass die Untersuchungen seinerzeit mit der ursprünglichen Entwicklung Asplunds durchgeführt wurden: Einer Art Hammermühle in einem Druckbehälter (Asplund 1940a). Die Zerkleinerungskinetik dieses Defibrators unterscheidet sich von modernen Refineranlage allerdings u.a. durch die Beanspruchungszeit der Faserstoffe zwischen 4 min und 13 min, wie in Muguet et al. (2012) beschrieben, gegenüber ca. 0,5 s auf der Mahlbahn moderner Refiner, wie Murton et al. (2002) postulierten.

Die Ergebnisse aus Abschnitt 7.3 sollen deshalb dazu genutzt werden, die spezifische elektrische Leistungsaufnahme als Funktion der Temperatur in Abhängigkeit der untersuchten Mahlscheibenmuster darzustellen. Dies soll zu einem besseren Verständnis des Erweichungsverhaltens von Fichten- und Buchenholz im TMP-Verfahren beitragen. In Abbildung 7.33 ist die spezifische elektrische Leistungsaufnahme für die Faserstofferzeugung mit der Holzart Fichte über der Aufschlusstemperatur aufgetragen. In Abbildung 7.33a zeigt die polynomiale Regression, die alle Mahlscheibenmuster sowie das RMP- und TMP-Verfahren umfasst, den von Asplund beschriebenen Zusammenhang. Diese negative Korrelation zwischen spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme und Sattdampf Temperatur wurde auch von Solala et al. (2014), mit der Weiterentwicklung des ursprünglichen Asplund-Defibrators (wing defibrator) und der Holzart Fichte (*Picea abies*) zwischen 130 °C und 170 °C, bestätigt. Im Gegensatz zu Asplund war ein deutlicher Rückgang der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme hier bereits ab 130 °C zu beobachten. Im Weiteren weisen die Ergebnisse von Krug (2010) mit Kiefernholz darauf hin, dass diese Beziehung auch bei Temperaturen zwischen 170 °C und 200 °C und einer längeren Verweilzeit besteht. Auf Basis der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit kann der Versuch unternommen werden, den Stand der Wissenschaft und Technik differenzierter zu betrachten und zu ergänzen. In Abbildung 7.33a wird deutlich, dass der oben beschriebene Zusammenhang zwischen Aufschlusstemperatur und spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme im TMP-Verfahren prinzipiell gültig ist. Die

Abnahme der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme hängt aber auch mit dem verwendeten Mahlscheibenmuster zusammen und scheint mit den Beobachtungen von Solala et al. (2014) übereinzustimmen. Das betrifft insbesondere die niedrigeren Aufschlusstemperaturen 135 °C und 150 °C. Bei einer Sattedampf Temperatur von 175 °C liegen die Werte der Mahlscheibenmuster bezüglich der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme dicht zusammen. Der Trend im RMP-Verfahren liegt überraschenderweise umgekehrt. Vom Einfluss der Mahlscheibenmuster und der Vergleichbarkeit der Beschaffenheit der erzeugten Faserstoffe abgesehen, macht es den Anschein, als dass die spezifische elektrische Leistungsaufnahme bei der Faserstoffherzeugung ohne Erwärmung durch Sattedampfdruck (20 °C) niedriger liegt. Gleichzeitig wird in Abbildung 7.33b deutlich, dass die Gestaltung der Mahlscheibe einen Einfluss auf die Steigung der Temperaturabhängigkeit hat. Die Mahlscheibenmuster 2 und 5 verursachen zwischen 135 °C und 150 °C die stärkste Reduzierung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme.

Abbildung 7.33: Spezifische elektrische Leistungsaufnahme als Funktion der Temperatur in der mechanischen Faserstoffherzeugung mit der Holzart **Fichte**. Temperaturbereich 20 °C bis 100 °C: RMP-Verfahren. Temperaturbereich 135 °C bis 175 °C: TMP-Verfahren. **a**, Polynomiale Regression nach Methode LOESS. **b**, Verbindung der Messpunkte zur Kenntlichmachung des Einflusses des Mahlscheibenmusters. $n=3-4$.

Mit der Holzart Buche verhält es sich ähnlich wie mit der Holzart Fichte, wie Abbildung 7.34 veranschaulicht. Die beschriebene Temperaturabhängigkeit und der Einfluss der Mahlscheibenmuster kann auch hier festgestellt werden (Abbildung 7.34a). Allerdings weisen die Ergebnisse auf größere Unterschiede bezüglich der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme bei höheren Aufschlusstemperaturen hin. In Abbildung 7.34b weisen die Mahlscheibenmuster 1, 4 und 5 eine überproportionale Abnahme der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme zwischen 135 °C und 150 °C auf. Die Ergebnisse belegen weiterhin die generell niedrigere spezifische elektrische Leistungsaufnahme mit der Holzart Buche im Vergleich zur Holzart Fichte. Dies betrifft auch die absolute Reduzierung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme im Zusammenhang mit der Aufschlusstemperatur, die hier niedriger ausfällt. Einen Erklärungsansatz für dieses Phänomen bietet der höhere Methoxygehalt von Buchenlignin. Damit einher geht eine geringere Anzahl

kondensierter Bindungen im Lignin, der unterhalb dem der Nadelhölzer liegt (Olsson & Salmén 1997). Laubhölzer weisen außerdem einen höheren Anteil an Xylanen als Nadelhölzer auf und unterscheiden sich auch in der Konstitution der Gluco-/Mannane sowie der Seitenketten, wodurch die niedrigere spezifische elektrische Leistungsaufnahme auch begründet werden kann (Fengel & Wegener 2003, S. 106). Im Gegensatz zur Faserstoffherzeugung im RMP-Verfahren mit der Holzart Fichte weisen die Ergebnisse in Abbildung 7.34b auf eine geringfügige Reduzierung der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme durch die Erwärmung der Buchenholz-Hackschnitzel mit Satttdampf hin.

Abbildung 7.34: Spezifische elektrische Leistungsaufnahme als Funktion der Temperatur in der mechanischen Faserstoffherzeugung mit der Holzart **Buche**. Temperaturbereich 20 °C bis 100 °C: RMP-Verfahren. Temperaturbereich 135 °C bis 175 °C: TMP-Verfahren. **a**, Polynomiale Regression nach Methode LOESS. **b**, Verbindung der Messpunkte zur Kenntlichmachung des Einflusses des Mahlscheibenmusters. $n=3-4$.

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, liegen der untersuchte Temperaturbereich sowie die Holzfeuchte im TMP-Verfahren weit über dem Glasübergangsbereich von Hemizellulose und den amorphen Bereiche der Zellulose. Das kann auch für das RMP-Verfahren angenommen werden. Folglich spielt das Lignin als steifste verbleibende Komponente im Zellverbund eine bedeutende Rolle für den elektrischen Energiebedarf in der Zerkleinerung. Der „Knick“ der polynomialen Regression bei ca. 100 °C (Abbildungen 7.33a und 7.34a) könnte auf die beginnende Ligninerweichung zwischen 100 und 135 °C hinweisen. Diese Beobachtung stimmt mit der Angabe von 120 °C nach Becker et al. (1977) und Blechschmidt et al. (1986), respektive 120 °C bis 135 °C nach Attack (1972) überein. Allerdings wurden in der vorliegenden Arbeit keine Messungen in diesem Temperaturbereich durchgeführt. Back & Salmén (1982) stellten einen sigmoidalen Verlauf der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme zwischen 100 °C und 190 °C fest, dessen größte Steigung im Temperaturbereich zwischen ungefähr 130 °C und ungefähr 170 °C liegt. Diese Beobachtungen werden durch Koran (1981) insofern bestätigt, als dass der Energieaufwand zur Trennung des Zellverbunds bei Temperaturen über 170 °C vernachlässigbar klein wird. Dies könnte auch die geringen Differenzen in der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme zwischen allen

Mahlscheibenmustern bei 175 °C erklären (s. Abbildung 7.33). Die vorliegenden Untersuchungen passen, insbesondere durch die polynomiale Regression in Abbildung 7.34a und Abbildung 7.33a, in das Muster der beschriebenen Literaturstellen. Es konnte allerdings ein erheblicher Einfluss der Mahlscheiben auf den Verlauf und die Höhe der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme nachgewiesen werden.

Die vorliegenden Untersuchungen bestätigen zudem die Temperaturabhängigkeit der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme. Die in Abschnitt 2.3.2 zusammengetragenen Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung zum Erweichungsverhalten liefern allerdings keine weiteren schlüssigen Erklärungen oder Anwendungen für die beobachteten Phänomene in der Faserstoffherzeugung. Durch die experimentelle Untersuchung konnte kein Zusammenhang zwischen M' , $\tan \delta$ und T_g und der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme im RMP- oder TMP-Verfahren gefunden werden. Die Methoden der DMA oder DMTA spiegeln nicht die tatsächlichen Prozessbedingungen (Satttdampfdruck, Temperatur, Holzfeuchte, Beanspruchungsart, -frequenz und -zeit) im RMP- oder TMP-Verfahren wider.

Zu dem in der Literatur angegebenen Beanspruchungsfrequenzbereich der Mahlscheiben konnte im Rahmen der Literaturrecherche der vorliegenden Dissertation keine Gleichung zur Berechnung derselben gefunden werden. Von Eriksen et al. (2006) sind Messungen der Beanspruchungsfrequenz in einem Twin-Refiner bekannt, die in etwa älteren Literaturangaben entsprechen. Daraus kann Gleichung 7.7 für die Berechnung der Beanspruchungsfrequenz abgeleitet werden:

$$f = \frac{N}{n} \quad (7.7)$$

- f Beanspruchungsfrequenz in Hz
- N Anzahl der Stege in einem bestimmten Bereich der Mahlbahn des Rotors
- n Umdrehungen des Rotors pro Sekunde

Mit Gleichung 7.7 wurde die Frequenz der untersuchten Mahlscheiben berechnet. Der Theorie zufolge müsste eine höhere Beanspruchungsfrequenz bei derselben Aufschlusstemperatur eine höhere spezifische elektrische Leistungsaufnahme nach sich ziehen. Das konnte nicht beobachtet werden, wie Abbildung 7.35 belegt. Dagegen sprechen auch Untersuchungen von Ferguson (1997), die zeigen, dass sich durch eine höhere Rotationsgeschwindigkeit der Mahlscheiben die spezifische elektrische Leistungsaufnahme senken lässt. In der mechanischen Faserstoffherzeugung geschehen viele Prozesse gleichzeitig, sodass es schwierig ist, einzelne Aspekte, wie die Beanspruchungsfrequenz zu charakterisieren, wie auch Salmén et al. (1999, 36 f.) anmerken. Die Gestaltungsmerkmale einer Mahlscheibe, wie Stegwinkel oder -krümmung sowie Anzahl und Position der Dämme, scheinen ausschlaggebender zu sein.

Abbildung 7.35: Zusammenhang zwischen spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme (SEL), Aufschluss-temperatur und Beanspruchungsfrequenz unterschiedlicher Mahlscheibenmuster. Aufschluss mit dem TMP-Verfahren. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche. $n=4$.

7.4.3 Holzfeuchte und Konsistenz nach dem Aufschluss

Über die Untersuchung zur Holzfeuchte von Hackschnitzeln in Sattedampf-atmosphäre (vgl. Abschnitt 7.2) hinaus ist die Feuchte und Konsistenz der Faserstoffe nach dem Aufschluss vor dem Hintergrund des elektrischen und thermischen Energiebedarfs in der Faserstoffherzeugung von Interesse. Es ist nicht bekannt, in welcher Beziehung die Aufschlussbedingungen und die spezifische elektrische Leistungsaufnahme mit der Holzfeuchte bzw. der Konsistenz stehen und ob in der Prozessführung möglicherweise darauf Einfluss genommen werden kann. Zu diesem Zweck wurde in den Untersuchungen zur spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme in der Faserstoffherzeugung (vgl. Abschnitt 7.3) ebenfalls die Konsistenz der Faserstoffe nach dem Aufschluss erfasst. Die Probennahme erfolgte unmittelbar am unteren Auslass des Zyklons der Laborrefineranlage, in welchem die Faserstoffe vom Dampf getrennt werden.

Die Ergebnisse der Konsistenzmessungen sind in den Abbildungen 7.36 und 7.37 zusammenfassend dargestellt. Wird die Konsistenz über der Aufschluss-temperatur aufgetragen, zeigt die polynomiale Regression in Abbildung 7.36a, dass der Anteil der Trockenmasse im RMP-Verfahren, trotz Erwärmung der Hackschnitzel mit Sattedampf bis ca. 100 °C, zunimmt. Weiter im TMP-Verfahren bis 175 °C weist die Regression eine kontinuierliche negative Steigung auf. Das bedeutet, dass die Wassersättigung bzw. der Wasseranteil zunimmt. In Abbildung 7.33 zeigt die spezifische elektrische Leistungsaufnahme einen ähnlichen Verlauf. Das Phänomen kann, zumindest für den Temperaturbereich von 100 °C bis 175 °C, durch eine Abhängigkeit der Konsistenz von der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme erklärt werden. Die Zerfaserung bei niedrigeren Temperaturen erfordert mehr elektrische Energie, da das Material steifer ist und größere Mengen an mechanischer Energie absorbiert (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Reibungsarbeit zwischen den Mahlscheiben führt zu einer stärkeren Erwärmung des Materials und die Holzfeuchte verdampft teilweise. Über die Dampfentwicklung zwischen den Mahlscheiben berichteten u.a. Peterson et al.

(1973) und Dana et al. (1975). Dieser Erklärungsansatz wird auch durch die Beobachtung gestützt, dass beispielsweise das Mahlscheibenmuster 1 jeweils die höchste Konsistenz und die höchste spezifische elektrische Leistungsaufnahme sowie das Mahlscheibenmuster 3 jeweils die niedrigste Konsistenz und die niedrigste spezifische elektrische Leistungsaufnahme aufweisen. Deutlich wird der Effekt in Abbildung 7.36b. Hier stellen die gestrichelten Linien den Bereich der Konsistenz der Hackschnitzel vor dem Aufschluss dar. Die Balken geben die berechnete Konsistenz der Hackschnitzel in Satttdampfatmosfera an (vgl. Abschnitt 7.2). Je höher die Aufschluss-temperatur und je geringer die spezifische elektrische Leistungsaufnahme, desto niedriger ist die Konsistenz der erzeugten Faserstoffe direkt nach dem Aufschluss. Das bedeutet, dass die Aufschluss-temperatur und die Mahlscheiben einen direkten Einfluss auf die Konsistenz und damit auf den thermischen Energiebedarf in der Faserstoff-Trocknung haben.

Abbildung 7.36: Arithmetische Mittelwerte der Konsistenz der Faserstoffe aus **Fichte** nach dem Aufschluss im RMP- (20 °C bis 100 °C) und TMP-Verfahren (135 °C bis 175 °C) mit unterschiedlichen Mahlscheiben. **a**, Polynomiale Regression nach Methode LOESS. **b**, Die gestrichelten Linien markieren die Standardabweichung der Konsistenz der Hackschnitzel vor dem Einfüllen in den Kocher. Die Balken zeigen die Konsistenz der Hackschnitzel infolge der Erwärmung in Satttdampfatmosfera vor der Zerfaserung an. $n=12$.

Bei der Holzart Buche sind die Zusammenhänge ähnlich wie bei der Holzart Fichte (vgl. Abbildung 7.37). Aufgrund der höheren Rohdichte des Buchenholzes liegen die Anfangs-Konsistenz und die Konsistenz der Faserstoffe vergleichsweise höher. Der Argumentation mit der Holzart Fichte folgend, führt die niedrigere spezifische elektrische Leistungsaufnahme bei der Holzart Buche zu geringeren Differenzen zwischen der berechneten und der gemessenen Konsistenz in Abbildung 7.37b. Die offenkundigen Abweichungen der Werte bei 150 °C, die teilweise höher liegen als bei 135 °C, sind auf das Anlagenkonzept zurückzuführen. Obwohl die Messungen reproduzierbar sind muss berücksichtigt werden, dass die Probennahme unterhalb des Zyklons nicht die tatsächliche Konsistenz nach dem Aufschluss widerspiegelt. Über den Zyklon entweicht der hauptsächliche Anteil des Dampfes und die Faserstoffe geben hier ebenfalls Feuchte ab.

Abbildung 7.37: Arithmetische Mittelwerte der Konsistenz der Faserstoffe aus **Buche** nach dem Aufschluss im RMP- (20 °C bis 100 °C) und TMP-Verfahren (135 °C bis 175 °C) mit unterschiedlichen Mahlscheiben. **a**, Polynomiale Regression nach Methode LOESS. **b**, Die gestrichelten Linien markieren die Standardabweichung der Konsistenz der Hackschnitzel vor dem Aufschluss. Die Balken stehen für die, der Sattdampf- und Hackschnitzelerwärmung entsprechende Konsistenz. $n=12$.

Für das TMP-Verfahren in der Papierherstellung gibt Kerekes (2015) eine Konsistenz unmittelbar vor der Zerkleinerung zwischen 30 % und 40 % für Nadelhölzer an. Diese Werte werden typischerweise durch Zugabe von Verdünnungswasser eingestellt. Attack & Wood (1973) und Miles & May (1990) stellten fest, dass mit steigender Konsistenz bis 25 % der elektrische Energiebedarf in der Zerkleinerung abnimmt. Aus der Herstellung von MDF oder Holzfaserdämmstoffen sind keine Zahlen zur Konsistenz bekannt. Es ist davon auszugehen, dass hier die Konsistenz der Hackschnitzel unmittelbar vor der Zerkleinerung von der Ausgangs-Holzfeuchte und der Sattdampf-temperatur bestimmt wird. Inwiefern eine höhere Konsistenz vor der Zerkleinerung Einfluss auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme und die Beschaffenheit der Faserstoffe im RMP- und TMP-Verfahren für die Holzfaserdämmstoffherstellung hat, ist ebenfalls nicht bekannt. Dies zu untersuchen ist die Aufgabe im folgenden Abschnitt.

7.4.4 Elektrischer und thermischer Energiebedarf in der Faserstoffherzeugung mit dem RMP- und dem TMP-Verfahren

Zum Abschluss der technologischen Untersuchungen der Faserstoffherzeugung steht die energie-technische Betrachtung des RMP- und des TMP-Verfahrens im Fokus. Von Interesse ist hierbei, wie sich die Anteile der elektrischen und der thermischen Energie in den bisherigen Untersuchungen zusammensetzen. Das System für die energietechnischen Betrachtungen wird hierzu auf die Hackschnitzelerwärmung mit Sattdampf, die Zerkleinerung zwischen den Mahlscheiben und die Trocknung der Faserstoffe ausgehend von der Konsistenz nach dem Aufschluss begrenzt. Weiterhin werden Wärmeverluste und Wirkungsgrade nicht in die Betrachtungen einbezogen. Es wird von einem möglichst idealen System ausgegangen, um grundlegende Zusammenhänge ohne den

Einfluss von Prozesstechnik erkennen zu können. Die Berechnung des Bedarfs an elektrischer und thermischer Energie in der Faserstoffherzeugung umfasst folglich nur grundlegende physikalische Zusammenhänge der Erwärmung, Zerkleinerung und Trocknung des Holzes.

Weitere Annahmen zur Berechnung des Energiebedarfs basieren auf den durchgeführten Untersuchungen im Labormaßstab sowie persönlichen Erfahrungen aus der MDF-Produktion und umfassen:

- Die mittlere spezifische elektrische Leistungsaufnahme aus den Untersuchungen in Abschnitt 7.3.
- Die mittlere Ausgangs-Holzfeuchte der Hackschnitzel aus den Untersuchungen in Abschnitt 7.3.
- Die Berechnung der Erwärmung der Hackschnitzel mit Sattedampf aus den Untersuchungen in Abschnitt 7.2.
- Die Trocknung der Faserstoffe auf eine Holzfeuchte von 10 %.
- Die Verdampfungswärme des Wassers mit 2260 kJ/kg bei einer Temperatur von 100 °C.

Die Berechnung des spezifischen thermischen Energiebedarfs in der Trocknung der Faserstoffe erfolgte nach Gleichung 7.8:

$$Q_{spez} = \frac{m_W \cdot r_W}{m_0} \quad (7.8)$$

Q_{spez}	Spezifischer thermischer Energiebedarf in Wh/kg
m_W	Masse des zu verdampfenden Wassers
r_W	Verdampfungsenthalpie von Wasser
m_0	Trockenmasse des Holzes als Bezugsgröße

In Tabelle 7.10 sind die Ergebnisse nach thermischem, elektrischem und gesamtem Energiebedarf getrennt aufgelistet. Die Berechnungen bestätigen die Beobachtungen und Erklärungsansätze aus den vorhergehenden Abschnitten. Bemerkenswert sind die gegenläufigen thermischen und elektrischen Anteile am Gesamtenergiebedarf mit steigender Aufschlusstemperatur (s. Abbildung 7.10). Die Holzart Buche weist in dem untersuchten Temperaturbereich generell einen deutlich niedrigeren Gesamtenergiebedarf auf. Mit der Holzart Buche wurde der höchste Gesamtenergiebedarf mit dem Mahlscheibenmuster 5 bei 135 °C ermittelt (636 Wh/kg). Für die Holzart Fichte ebenfalls bei 135 °C mit dem Muster 2 (945 Wh/kg). Die niedrigsten Werte für die Holzart Buche lieferten die Kombinationen Mahlscheibenmuster 4/150 °C (482 Wh/kg) und Mahlscheibenmuster 5/150 °C (484 Wh/kg). Mit der Holzart Fichte sind die energetisch günstigsten Kombinationen Mahlscheibenmuster 3/150 °C (662 Wh/kg) und Mahlscheibenmuster 5/150 °C (699 Wh/kg).

Tabelle 7.10: Abschätzung des thermischen, elektrischen und gesamten Energiebedarfs in der Faserstoffherzeugung nach dem TMP- und RMP-Verfahren.

Var.	Mahlsch.	Holzart	Temp. °C	Energiebedarf				
				thermisch Wh/kg _{atro}	elektrisch Wh/kg _{atro}	gesamt Wh/kg _{atro}	thermisch %	elektrisch %
TMP-Verfahren								
1	1	Fichte	135	322	545	867	37	63
2	1	Fichte	150	528	330	858	62	38
3	1	Fichte	175	637	127	764	83	17
4	1	Buche	135	339	270	609	56	44
5	1	Buche	150	354	166	520	68	32
6	1	Buche	175	469	137	606	77	23
7	2	Fichte	135	468	477	945	50	50
8	2	Fichte	150	588	130	718	82	18
9	2	Fichte	175	618	112	730	85	15
10	2	Buche	135	373	199	572	65	35
11	2	Buche	150	422	142	564	75	25
12	2	Buche	175	437	105	542	81	19
13	3	Fichte	135	504	174	678	74	26
14	3	Fichte	150	550	112	662	83	17
15	3	Fichte	175	631	80	711	89	11
16	3	Buche	135	410	149	559	73	27
17	3	Buche	150	408	123	531	77	23
18	3	Buche	175	424	63	487	87	13
19	4	Fichte	135	389	547	936	42	58
20	4	Fichte	150	496	268	764	65	35
21	4	Fichte	175	649	111	760	85	15
22	4	Buche	135	353	233	586	60	40
23	4	Buche	150	362	120	482	75	25
24	4	Buche	175	454	101	555	82	18
25	5	Fichte	135	328	412	740	44	56
26	5	Fichte	150	535	164	699	77	23
27	5	Fichte	175	639	118	757	84	16
28	5	Buche	135	318	318	636	50	50
29	5	Buche	150	369	115	484	76	24
30	5	Buche	175	459	96	555	83	17
RMP-Verfahren								
1	6	Fichte	20	123	464	587	21	79
2	6	Fichte	100	310	421	731	42	58
3	6	Buche	20	90	235	325	29	71
4	6	Buche	100	247	215	462	51	49

Var. = Variante, Mahlsch. = Mahlscheibenmuster, Temp. = Aufschlussstemperatur

Im RMP-Verfahren zeigen die Varianten ohne Hackschnitzelerwärmung mit Sattedampf die günstigsten Werte im Hinblick auf den Gesamtenergiebedarf. Durch die Erwärmung der Hackschnitzel mit Sattedampf bei 100 °C liegt der Gesamtenergiebedarf im Bereich der Spannweite des TMP-Verfahrens. Dies gilt für die Holzarten Buche und Fichte gleichermaßen. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass im RMP-Verfahren eine Reduzierung und Vereinfachung der Prozessschritte möglich ist. Im RMP-Verfahren ist keine energie- und wartungsintensive Stopfschnecke notwendig. Es fällt kein Quetschwasser an, das aufbereitet und geklärt werden muss. Hochdruck-

Dampferzeugung und Druckbehälter sind in diesem Fall nicht erforderlich. Weiterhin fällt der Dampfverlust durch den Transport der Faserstoffe in der Blasleitung weg. Insbesondere in der Holzfaserdämmstoffherstellung mit relativ niedrigen Durchsätzen ist der Einsatz eines energiesparenden Bandrockners mit Wärmerückgewinnung anstelle eines elektrisch und thermisch aufwendigen Stromrohrrockners denkbar. Insgesamt sind dadurch geringere Investitions- und Betriebskosten zu erwarten.

Temperaturabhängige Ausbeuteverluste wurden nicht untersucht. Wie in Abschnitt 7.2 bereits diskutiert, steigt mit höherer Aufschlussstemperatur und Verweilzeit der thermisch bedingte Massenverlust an. Insbesondere bei Laubhölzern verläuft Back & Salmén (1982) zufolge, der Ausbeuteverlust rascher und bei niedrigeren Temperaturen. Laut Back & S. A. Larsson (1972) bestehen die wirtschaftlichen Vorteile einer niedrigeren Aufschlussstemperatur in einer höheren Ausbeute, niedrigerem Dampfverbrauch und geringerer Abwasserbelastung. Ebenda weisen außerdem darauf hin, dass niedrigere Aufschlussstemperaturen flexiblere Fasern erzeugen, die allerdings eine erhöhte Wasseraufnahme und Dickenquellung mit sich bringen. Dies wird allgemein durch die Freilegung der S2-Schicht der Zellwand begründet.

Abbildung 7.38: Verhältnis des elektrischen und thermischen Energiebedarfs der Faserstoffherzeugung im RMP-Verfahren (20 °C bis 100 °C) und TMP-Verfahren (135 °C bis 175 °C). Der thermische Energiebedarf enthält den Energiebedarf für die Erwärmung der Hackschnitzel und für die Trocknung der Faserstoffe. Die Schwankungen um die Mittelwerte werden durch die Mahlscheibenmuster verursacht. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche.

In Abbildung 7.38 sind die Ergebnisse aus Tabelle 7.10 zusammenfassend übersichtlich dargestellt. Die auffällige Reduzierung des thermischen Energiebedarfs bei 20 °C ist auf die hier fehlende Erwärmung der Hackschnitzel mit Frischdampf zurückzuführen. Der Bedarf an thermischer Energie wird allein durch die Trocknung der Faserstoffe verursacht. Zusätzlich kann der zwischen den Mahlscheiben entstehende und in den Kocher zurückströmende Dampf zur Erwärmung der Hackschnitzel genutzt werden.

7.5 Untersuchungen zur Beschaffenheit der Faserstoffe

7.5.1 Einleitung

Vor dem Hintergrund des in der Holzfaserdämmstoffproduktion eingesetzten Trockenverfahrens wurden zur Untersuchung der Beschaffenheit der Faserstoffe zwei **trockene Analysemethoden** ausgewählt. Die Kollektivmethode der Luftstrahl-Prüfsiebung und die Individualmethode der quantitativen Bildanalyse. Die Verfahren erlauben unterschiedliche Erkenntnisse bezüglich der Dispersitätseigenschaften der Faserstoffe. Die Luftstrahl-Prüfsiebung eignet sich zur Analyse des gesamten Partikelkollektivs nach der Mengenart Masse. Die quantitative Bildanalyse hingegen ermöglicht Aussagen über Formfaktoren individueller Partikel mit verschiedenen Gewichtungen. Für die Charakterisierung der trockenen Faserstoffe steht allgemein eine geringe Auswahl an Methoden zur Verfügung, die außerdem in der Holzwerkstoffindustrie, wie auch in der Laborpraxis weder allgemein akzeptiert noch vollständig entwickelt oder standardisiert sind. Aus der Papierherstellung sind standardisierte Methoden zur Ermittlung charakteristischer Kennwerte für die Beschaffenheit von in Wasser suspendierten Faserstoffen bekannt (z.B. Schopper Riegler, canadian standard freeness (CSF)), die in Beziehung mit bestimmten Produkteigenschaften stehen. In der Holzforschung zu MDF und in der Holzwerkstoffindustrie ist weitgehend bekannt und untersucht, dass der Rohstoff Holz und die Beschaffenheit der Faserstoffe Produktionsprozesse und Produkteigenschaften beeinflussen. Die entscheidende Produkteigenschaft der Holzfaserdämmstoffe, die Wärmeleitfähigkeit, wurde dahingehend noch nicht umfassend untersucht. Es ist weitgehend unbekannt, welche **Charakteristika** Faserstoffe besitzen sollten, um eine möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit zu erzielen. Wie die Untersuchung von industriellen Holzfaserdämmstoffen in einer ersten Annäherung gezeigt hat, zeigen sich deutliche Unterschiede in den Dispersitätseigenschaften (Tabelle 7.4 und Tabelle 7.3).

Das **Ziel der Untersuchungen** zur Beschaffenheit der Faserstoffe ist zum einen die Auswirkung der Faserstofferzeugung im RMP- und TMP-Verfahren mit unterschiedlichen Mahlscheiben zu ermitteln. Zum anderen soll die Analyse dazu dienen, funktionale Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Dispersitätseigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit der erzeugten Faserstoffe sichtbar zu machen. Im einfachsten Fall kann eine bestimmte charakteristische Partikelgröße, z. B. der Medianwert maßgeblich sein. Eventuell hängen bestimmte Eigenschaften der Verteilungsfunktion oder der Partikelklassen mit der Wärmeleitfähigkeit zusammen. Dies wird im Abschnitt 7.6 näher betrachtet.

7.5.2 Dispersitätseigenschaften nach der Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung

Der Fokus der Charakterisierung der Faserstoffe mit der Luftstrahl-Prüfsiebung liegt auf den Auswirkungen der Mahlscheiben und Aufschlusstemperaturen auf die Faserstoffe. Die Kollektivmethode vermittelt einen umfassenden Eindruck über die Wirksamkeit und Leistungsfähigkeit in der mechanischen Zerkleinerung, durch die **Erfassung sämtlicher Partikel** des Kollektivs. Die Probenmasse liegt um eine Zehnerpotenz höher als in der Methode der quantitativen Bildanalyse, was insbesondere in der Erfassung zahlenmäßig geringer Faserbündel und Agglomerate mit vergleichsweise hoher Masse vorteilhaft ist. Die Methode der Luftstrahl-Prüfsiebung scheint für die Erfassung dieser voluminösen und verzweigten Partikel und Agglomerate im Vergleich zur Bildanalyse (Abschnitt 7.5.3) besser geeignet zu sein.

In Tabelle 7.11 ist der Medianwert $x_{50,3}$ als eine repräsentative Größe der Faserstoffe angegeben (Bohnet 2004, S. 29). Ein weiteres Charakteristikum ist das 97 %-Perzentil ($x_{97,3}$), das auch zur

Tabelle 7.11: Dispersitätseigenschaften der Faserstoffe nach der Kollektivmethode **Luftstrahl-Prüfsiebung**.

Var.	Mahlsch.	Holzart	Temp.	$\bar{x}_{50,3}$ μm	σ μm	$\bar{x}_{97,3}$ μm	σ μm	Partikel- ausdehnung μm
TMP-Verfahren								
1	1	Fichte	135	153	8	1359	249	1205
2	1	Fichte	150	269	38	1309	249	1040
3	1	Fichte	175	270	21	1377	247	1107
4	1	Buche	135	200	0	742	278	542
5	1	Buche	150	*	*	1299	626	*
6	1	Buche	175	*	*	927	435	*
7	2	Fichte	135	363	71	1532	417	1195
8	2	Fichte	150	671	74	2428	59	1757
9	2	Fichte	175	340	71	1434	66	1094
10	2	Buche	135	378	34	1427	36	1049
11	2	Buche	150	148	0	1030	391	882
12	2	Buche	175	*	*	743	247	*
13	3	Fichte	135	768	22	2399	42	1631
14	3	Fichte	150	679	53	2401	0	1722
15	3	Fichte	175	438	71	1930	271	1492
16	3	Buche	135	376	36	1484	74	1108
17	3	Buche	150	160	29	1110	310	950
18	3	Buche	175	127	0	923	263	795
19	4	Fichte	135	397	88	1444	185	1046
20	4	Fichte	150	317	56	1429	338	1112
21	4	Fichte	175	415	45	1674	143	1260
22	4	Buche	135	268	23	970	17	702
23	4	Buche	150	230	20	1276	72	1046
24	4	Buche	175	137	4	602	8	465
25	5	Fichte	135	206	27	995	205	789
26	5	Fichte	150	399	49	1761	217	1362
27	5	Fichte	175	290	22	1073	135	783
28	5	Buche	135	271	43	1306	453	1035
29	5	Buche	150	174	35	965	25	791
30	5	Buche	175	129	0	623	9	495
RMP-Verfahren								
1	6	Fichte	20	484	32	1656	134	1172
2	6	Fichte	100	532	104	1888	289	1356
3	6	Buche	20	406	46	1610	142	1205
4	6	Buche	100	420	54	1702	273	1281

* Verteilungssumme beginnt oberhalb von $x_{50,3}$

Var. = Variante, Mahlsch. = Mahlscheibenmuster, Temp. = Aufschlussstemperatur

Berechnung der Partikel ausdehnung dient. Dieser Feinheitskennwert wird im vorliegenden Fall für ein oberes Feinheitsintervall formuliert (Gleichung 6.3). Die Ergebnisse der mittels Luftstrahl-Prüfsiebung ermittelten Kennwerte decken die Größenverteilung der Faserstoffe aus Tabelle 7.3 ab. Folglich kann festgehalten werden, dass die Dispersitätseigenschaften der labortechnisch hergestellten Faserstoffe mit solchen aus industrieller Produktion vergleichbar sind.

Aus den Verteilungssummen in Abbildung 7.39 lassen sich weitere Charakteristika ablesen. Es

ist ersichtlich, dass die Verteilungen in Abhängigkeit der Holzart, der Aufschlussstemperatur und der Mahlscheibenmuster variieren. Die Abhängigkeit der Dispersitätseigenschaften von den Mahlscheibenmustern tritt besonders deutlich in der Aufschlussstemperatur 135 °C hervor. Ferner sind die Spezifikationen der Mahlscheiben in den erzeugten Dispersitätseigenschaften sichtbar. Insbesondere in den Abbildungen a, b und c sind Paarungen der Mahlscheibenmuster 2 und 3 sowie 4 und 5 erkennbar. Dies ist durch die grundsätzliche Ähnlichkeit in der Konstruktion dieser Paarungen erklärbar. Anhand der Schnittpunkte der Verteilungssummen mit den Perzentilen $x_{50,3}$ und $x_{97,3}$ wird weiterhin deutlich, dass der **Einfluss der Mahlscheiben** mit steigender Aufschlussstemperatur abnimmt. Dieser Effekt passt zu der Beobachtung aus Abbildung 7.33 und Abbildung 7.34. Dort wurde festgestellt, dass die Unterschiede in der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme zwischen den Mahlscheibenmustern mit steigender Aufschlussstemperatur geringer werden. Die grundsätzlich feinere Verteilung der Buchenholz-Faserstoffe ist an dem hohen Durchgang durch die Siebmaschenweite 125 μm erkennbar. Dieser Zustand kann mit den anatomischen Merkmalen dieser Holzart erklärt werden (Tabelle 2.1). Dabei kommt die stärker differenzierte Gewebestruktur des Buchenholzes mit geringeren Anteilen an faserartigen und kürzeren faserartigen Zellen zum Tragen.

Zur Dispersitätseigenschaft Feinheit ist anzumerken, dass das Luftstrahlsieb grundsätzlich prädestiniert für die Analyse feindisperser Stoffe mit Korngrößen zwischen 20 μm und 100 μm ist (Batel 1957; Menck 1994). Durch die Dispergierwirkung des Luftstrahls lassen sich die Haftkräfte zwischen den Partikeln überwinden (Schmidt 1967). Eigene Voruntersuchungen und die Untersuchungen durch Schirp et al. (2015) zeigen, dass mit Siebmaschenweiten unter 125 μm (32 μm und 63 μm) die Aussagekraft der Verteilungssumme im unteren Feinheitsintervall verbessert werden kann. Die vorliegenden Untersuchungen werden durch eine Bildanalyse ergänzt, weshalb auf den Einsatz kleinerer Maschenweiten zugunsten einer feineren Abstufung bei größeren Maschenweiten verzichtet wurde.

Abbildung 7.39: Vergleichende Darstellung der massengewichteten Verteilungssumme Q_3 der mit unterschiedlichen Mahlscheiben im **TMP-Verfahren** erzeugten Faserstoffen. **a, c, e**: In der linken Spalte sind die Verteilungssummen der Fichtenholz-Faserstoffe aufsteigend nach der Sattdampf-temperatur dargestellt. **b, d, f**: In der rechten Spalte sind die Verteilungssummen der Buchenholz-Faserstoffe aufsteigend nach der Sattdampf-temperatur dargestellt. Doppelbestimmung.

Die teilweise deutlichen Unterschiede zwischen den Holzarten und Aufschlussbedingungen sind bei der Faserstoffherzeugung im RMP-Verfahren nicht zu beobachten. Davon abgesehen, dass hier nur ein Mahlscheibenmuster untersucht werden konnte, liegen die Verteilungssummen in Abhängigkeit der Aufschluss Temperaturen und der Holzarten recht ähnlich. Die Dispersitätseigenschaften der RMP-Faserstoffe liegen im Bereich der TMP-Faserstoffe mit der Aufschluss Temperatur 135 °C.

Abbildung 7.40: Vergleichende Darstellung der massengewichteten Verteilungssumme Q_3 der mit dem Mahlscheibenmuster 6 im **RMP-Verfahren** erzeugten Faserstoffen. **a**, Verteilungssummen der Fichtenholz-Faserstoffe. **b**, Verteilungssummen Buchenholz-Faserstoffe. Doppelbestimmung.

Weitergehend führt die Betrachtung des Medianwerts in Abbildung 7.41 zu Erkenntnissen über Zusammenhänge zwischen Mahlscheibenmuster, spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme und Feinheit der Faserstoffe. Hier zeigt sich die, in Abbildung 7.39 bereits beobachtete, Abhängigkeit der Dispersitätseigenschaften von dem Mahlscheibenmuster und der Aufschluss Temperatur. Die Spreizung des Medianwerts und der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme nimmt bei der **Holzart Fichte** mit steigender Aufschluss Temperatur zu. Das Mahlscheibenmuster 3 sticht hierbei mit den höchsten Medianwerten und den niedrigsten Werten für die spezifische elektrische Leistungsaufnahme heraus. Eine hohe spezifische elektrische Leistungsaufnahme führt bei der Holzart Fichte durchgängig zu kleineren Medianwerten. Bei der **Holzart Buche** scheint die Temperatur einen höheren Einfluss auf die Feinheit der Faserstoffe zu haben. Ein Erklärungsansatz hierfür ist die geringere Erweichungstemperatur des Buchenholzes. Der generelle Einfluss der Aufschluss Temperatur auf die Feinheit der Faserstoffe wird u.a. durch Brombacher et al. (2016) bestätigt. Bemerkenswert ist weiterhin, dass die Gruppierung der Aufschluss Temperatur mittels der Verbindungslinien in Abbildung 7.41a anzeigt, dass die Spannweite der Medianwerte $x_{50,3}$ der Gruppe A (175 °C) sowie der Gruppe B (150 °C) innerhalb der Spannweite der Gruppe C (135 °C) liegen. Bei der Holzart Buche ist das nicht der Fall (Abbildung 7.41b).

Die Faserstoffherzeugung im **RMP-Verfahren** ist in Abbildung 7.41 durch die Mahlscheibe 6 repräsentiert. Bei der Holzart Fichte liegen die Medianwerte bezüglich der Siebmaschenweite

innerhalb der Spannweiten der Gruppen A, B und C. Das ist vielversprechend in Bezug auf die Eignung des Verfahrens für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen. Bei der Holzart Buche hingegen liegen die Medianwerte relativ hoch. Die Aussagekraft von Regressionsanalysen wurde überprüft, ist jedoch durch die nur teilweise vorliegende Normalverteilung stark eingeschränkt.

Abbildung 7.41: Vergleichende Darstellung des massengewichteten Medianwerts der Siebmaschenweite $x_{50,3}$ nach der Luftstrahl-Prüfsiebung über der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) in Abhängigkeit der Mahlscheibenmuster und Aufschlusstemperatur. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche. Gruppierung nach der Aufschlusstemperatur über Verbindungslinien: Gruppe A, 175 °C; Gruppe B, 150 °C; Gruppe C, 135 °C; Gruppe D, 100 °C; Gruppe E, 20 °C.

In Ergänzung zu den bereits beschriebenen Charakteristika bietet die **PartikelAusdehnung** einen weiteren Einblick in die Beschaffenheit der Faserstoffe (Abbildung 7.42). Die PartikelAusdehnung ist ein Maß für die Homogenität der Größenverteilung der Faserstoffe. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass das Mahlscheibenmuster 3 mit der Holzart Fichte eine vergleichsweise heterogene Größenverteilung und das Mahlscheibenmuster 5 eine vergleichsweise homogene Größenverteilung erzeugen. Interessant ist auch die relativ breite Streuung der PartikelAusdehnung bei niedriger spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme im Vergleich zur geringen Spannweite der Medianwerte bei niedriger spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme in Abbildung 7.41a. Dies ist ein Indiz dafür, dass mit der Holzart Fichte bei niedriger spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme (und hoher Aufschlusstemperatur) eher eine heterogene Größenverteilung erzeugt wird. Bei der Holzart Buche nimmt dagegen mit geringer spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme die Heterogenität eher ab.

Abbildung 7.42: Vergleichende Darstellung der Partikelausdehnung über der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL) im **TMP-Verfahren**. **a**, Fichtenholz-Faserstoffe. **b**, Buchenholz-Faserstoffe.

Bei der übergeordneten Betrachtung der Luftstrahl-Prüfsiebung müssen abschließend **Einflüsse auf die Ergebnisse und Fehlerquellen** diskutiert werden. Unter der Annahme, dass die Stichprobenauswahl und die Probenentzug mit größter Sorgfalt durchgeführt wurden, können Abweichungen durch undispergierte agglomerierte feine Partikel verursacht werden, die als Grobgut ausgetragen werden (DIN ISO 9276-2:2018-09 2018). Eine weitere mögliche Fehlerquelle besteht durch den Abrieb der Faserstoffe infolge des dispergierenden Luftstrahls. Vorversuche zur Ermittlung von Siebrückstandszeitkurven zeigten, dass mit Faserstoffen die anfänglich starke Abnahme des Siebrückstands nicht regelmäßig konstant wird. Es könnte also zutreffen, dass z.B. die verzweigten, nicht vollständig separierten Faserbündel, die in der Breite aus mindestens zwei Zellen bestehen, abriebempfindlich sind. Dies erschwert die Siebdauerbestimmung durch das Abbruchkriterium nach DIN 66165-1:2016-08 (2016) oder Coppers (2002).

7.5.3 Dispersitätseigenschaften nach der Individualmethode quantitative Bildanalyse

In Ergänzung zur Luftstrahlsiebanalyse bietet die quantitative Bildanalyse als Individualmethode die Möglichkeit, weitere Informationen über die Partikelgrößenverteilung und insbesondere die Partikelform zu ermitteln. In der Auswertung und Darstellung der Ergebnisse wird deshalb neben Untersuchungen zu den Auswirkungen der Mahlscheiben auf die Faserstoffe auch versucht, funktionelle Zusammenhänge zwischen den Dispersitätseigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe zu identifizieren. Zur Identifizierung ebendieser Zusammenhänge wurde die Methode von Wenderdel et al. (2014, 2016b, 2017) zur Bildung von **Partikelklassen** adaptiert, die für die Untersuchung von MDF entwickelt wurde und dort brauchbare Ergebnisse lieferte. Zu diesem Zweck erfolgte eine flächenbezogene Gewichtung der Verteilungssumme. Die Partikel wurden in Klassen anhand der im TMP- und RMP-Verfahren typischerweise entstehenden Partikelformen und den anatomischen Merkmalen des Fichten- und Buchenholzes eingeteilt. Dadurch sollen

Var.	Mahlsch.	Holzart	Temp.	Partikel	Flächenanteil der Partikelklasse																	
					fa		kf		FB		LF		KF		GS		FS					
			°C	n	$\bar{x}$	σ	%	$\bar{x}$	σ	%	$\bar{x}$	σ	%	$\bar{x}$	σ	%	$\bar{x}$	σ	%	$\bar{x}$	σ	%
TMP-Verfahren																						
1	1	Fichte	135	448.062	84,0	1,2	16,0	1,2	52,0	1,4	24,7	1,3	7,3	0,6	4,0	0,6	1,0	1,2	1,2			
2	1	Fichte	150	122.490	96,3	0,3	3,7	0,3	54,8	1,6	28,3	1,4	13,2	0,6	1,4	0,1	2,3	0,3	0,3			
3	1	Fichte	175	98.041	96,5	0,6	3,5	0,6	51,3	0,9	31,7	0,5	13,4	0,5	1,4	0,1	2,2	0,5	0,5			
4	1	Buche	135	681.753	87,7	2,5	12,3	2,5	65,7	1,1	6,8	0,7	15,2	1,6	5,0	1,1	7,4	1,5	1,5			
5	1	Buche	150	721.186	87,0	1,8	13,0	1,8	60,9	1,8	9,5	0,6	16,6	0,4	5,4	1,0	7,6	0,8	0,8			
6	1	Buche	175	674.246	83,1	1,3	16,9	1,3	51,8	1,7	12,5	0,2	18,8	0,5	6,7	0,9	10,2	0,6	0,6			
7	2	Fichte	135	164.048	93,4	1,3	6,6	1,3	51,4	2,2	31,3	2,7	10,7	0,8	1,8	0,2	4,8	1,1	1,1			
8	2	Fichte	150	54.359	97,0	1,0	3,0	1,0	55,0	3,3	33,4	1,9	8,5	1,0	1,4	0,6	4,6	0,4	0,4			
9	2	Fichte	175	92.285	96,3	0,9	3,7	0,9	49,5	2,3	35,6	2,4	11,2	1,1	1,4	0,3	2,3	0,7	0,7			
10	2	Buche	135	164.212	91,2	2,4	8,8	2,4	60,8	2,2	10,3	,8	20,1	3,0	2,8	0,9	6,0	1,8	1,8			
11	2	Buche	150	340.376	88,0	1,9	12,0	1,9	58,9	1,9	11,1	0,3	18,0	0,5	4,4	0,9	7,6	1,2	1,2			
12	2	Buche	175	413.425	88,2	2,4	11,8	2,4	52,5	0,4	14,0	0,7	21,7	1,3	4,9	1,1	6,9	1,3	1,3			
13	3	Fichte	135	27.146	97,5	0,6	2,5	0,6	40,5	4,0	49,8	4,6	7,2	1,5	1,0	0,2	1,4	0,5	0,5			
14	3	Fichte	150	41.699	97,3	0,5	2,7	0,5	50,8	2,4	37,3	2,2	9,2	1,0	1,2	0,3	1,4	0,2	0,2			
15	3	Fichte	175	62.056	97,3	0,1	2,7	0,1	52,8	2,8	33,7	2,0	10,8	0,9	0,9	0,1	1,8	0,1	0,1			
16	3	Buche	135	246.348	87,3	1,6	12,7	1,6	62,1	0,7	8,2	0,6	17,0	0,9	3,8	0,6	8,9	1,1	1,1			
17	3	Buche	150	252.043	91,7	2,0	8,3	2,0	63,0	0,4	11,4	0,9	17,3	1,1	2,8	0,7	5,5	1,4	1,4			
18	3	Buche	175	193.144	88,1	3,2	11,9	3,2	56,6	2,9	11,5	2,1	19,9	2,7	3,9	1,0	8,0	2,3	2,3			

Var. = Variante, Mahlsch. = Mahlscheibenmuster, Temp. = Aufschlusstemperatur, fa = faserartig, kf = kornförmig, FB = Faserbündel, LF = Langfaser, KF = Kurzfaser, GS = Grobstoff, FS = Feinstoff,

Tabelle 7.13: Fortsetzung der Tabelle: Flächenanteile der Partikelklassen in den Faserstoffvarianten.

Var.	Mahlsch.	Holzart	Temp.	Partikel	Flächenanteil der Partikelklasse												FS									
			°C	n	fa	kf			FB			LF			KF			GS			FS					
					$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	%	σ	%	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	%	σ	%	$\bar{x}$	σ	%	$\bar{x}$	σ	%	$\bar{x}$	σ	%	
TMP-Verfahren																										
19	4	Fichte	135	149.787	92,4	0,7	7,6	0,7	58,3	1,1	24,9	1,1	24,9	1,1	9,1	0,2	2,8	0,2	4,8	0,7						
20	4	Fichte	150	170.814	94,5	1,3	5,5	1,3	49,8	1,7	32,4	1,7	32,4	1,9	12,2	0,4	1,8	0,2	3,8	1,1						
21	4	Fichte	175	67.461	95,3	1,1	4,7	1,1	48,7	1,2	35,6	1,2	35,6	1,5	11,1	0,5	2,0	0,3	2,7	0,8						
22	4	Buche	135	245.230	89,1	0,5	10,9	0,5	64,7	0,7	7,0	0,7	7,0	0,7	17,4	1,2	3,4	0,5	7,5	0,5						
23	4	Buche	150	297.941	90,3	0,8	9,7	0,8	61,7	1,9	9,8	0,5	9,8	0,5	18,8	1,3	3,3	0,4	6,4	0,6						
24	4	Buche	175	333.263	88,8	2,4	11,2	2,4	57,3	0,5	10,4	0,5	10,4	0,5	21,2	1,8	4,3	1,2	6,9	1,2						
25	5	Fichte	135	330.427	88,4	1,7	11,6	1,7	59,8	1,5	21,1	0,9	21,1	0,9	7,5	0,7	3,9	0,4	7,7	1,4						
26	5	Fichte	150	102.973	94,4	0,5	5,6	0,5	61,6	3,5	26,1	3,8	26,1	3,8	6,7	0,5	2,5	0,3	3,0	0,2						
27	5	Fichte	175	110.527	95,1	0,9	4,9	0,9	63,5	0,9	24,1	0,6	24,1	0,6	7,5	0,5	2,1	0,4	2,8	0,6						
28	5	Buche	135	365.870	88,4	1,3	11,6	1,3	64,3	1,4	6,6	0,6	6,6	0,6	17,5	1,9	3,7	0,5	7,9	0,9						
29	5	Buche	150	271.855	91,0	0,8	9,0	0,8	65,9	1,0	8,6	0,6	8,6	0,6	16,5	0,7	2,8	0,3	6,2	0,5						
30	5	Buche	175	373.403	86,7	2,3	13,3	2,3	59,0	0,8	9,4	0,4	9,4	0,4	18,3	1,5	4,2	0,8	9,1	1,5						
RMP-Verfahren																										
1	6	Fichte	20	130.820	94,0	2,3	6,0	2,3	54,5	2,1	30,1	3,7	30,1	3,7	9,4	0,5	2,3	0,8	3,7	1,6						
2	6	Fichte	100	116.935	94,0	0,9	6,0	0,9	55,1	2,3	30,1	2,2	30,1	2,2	8,8	0,4	2,2	0,4	3,8	0,6						
3	6	Buche	20	344.595	83,9	1,7	16,1	1,7	42,7	1,3	9,0	0,9	9,0	0,9	32,2	2,2	4,3	0,5	11,8	1,2						
4	6	Buche	100	363.062	86,7	2,2	13,3	2,2	56,6	2,3	6,6	1,0	6,6	1,0	23,5	1,3	4,5	0,8	8,8	1,5						

Var. = Variante, Mahlsch. = Mahlscheibenmuster, Temp. = Aufschlussstemperatur, fa = faserartig, kf = kornförmig, FB = Faserbündel, LF = Langfaser, KF = Kurzfaser, GS = Grobstoff, FS = Feinstoff.

Var. = Variante, Mahlsch. = Mahlscheibenmuster, Temp. = Aufschlusstemperatur, fa = faserartig, kf = kornförmig, FB = Faserbündel, LF = Langfaser, KF = Kurzfaser, GS = Grobstoff, FS = Feinstoff,

Unterschiede zwischen den Dispersitätseigenschaften der einzelnen Faserstoffe sichtbar gemacht werden. In Tabelle 7.12 und Tabelle 7.13 sind die Werte zu den Flächenanteilen der Partikelklassen der Faserstoffvarianten enthalten.

Abbildung 7.43: Flächenanteile der Partikelklassen. **a**, Holzart Fichte, TMP-Verfahren. **b**, Holzart Buche, TMP-Verfahren. **c**, Holzart Fichte, RMP-Verfahren. **d**, Holzart Buche, RMP-Verfahren. Abkürzungen: fa = faserartig, kf = kornförmig, FB = Faserbündel, LF = Langfaser, KF = Kurzfaser, GS = Grobstoff, FS = Feinstoff.

Der Übersichtlichkeit halber sind in Abbildung 7.43 die Flächenanteile der Partikelklassen aus Tabelle 7.12 und Tabelle 7.13 als Boxplots, ohne Unterteilung nach Mahlscheiben oder Aufschluss-temperatur, dargestellt. Daraus geht hervor, dass die **faserartigen Partikel** (fa) erwartungsgemäß den größten Flächenanteil besitzen. Die weitere Unterteilung in Faserbündel (FB), Langfasern (LF) und Kurzfasern (KF) zeigt, dass die Klasse der Faserbündel bei beiden Holzarten sowie im TMP- und RMP-Verfahren den größten Flächenanteil besitzt. Den zweithöchsten Flächenanteil nehmen bei der Holzart Fichte die Langfasern ein, die aus individuellen, intakten Tracheiden bestehen sollten. Diese Klasse ist bei der Holzart Buche nicht vorrangig vertreten, was auf den geringen Anteil der Fasertracheiden und Libriformfasern zurückzuführen ist. Eine weitere Erklärung hierfür könnte sein, dass das angewendete Sekundärkriterium der minimalen und maximalen Faserlänge für die Holzart Buche nicht passend gewählt wurde. Jedenfalls übersteigt in dieser Darstellung der Flächenanteil der Kurzfasern bzw. Faserbruchstücke jenen der Langfasern.

Es wird außerdem deutlich, dass der Flächenanteil der **kornförmigen Partikel** (kf) mit einem hohen Dicke-zu-Länge-Verhältnis ($E > 0,3$) bei der Holzart Buche höher, als bei der Holzart Fichte ist. Eine weitere Differenzierung dieser Klasse in Grobstoff (GS) und Feinstoff (FS) anhand des größten Durchmessers der ausgefüllten Fläche (maximaler Feret-Durchmesser) zeigt, dass der Anteil an Partikeln $< 50 \mu\text{m}$ und $> 50 \mu\text{m}$ recht ähnlich ist. Hierzu muss angemerkt werden, dass die Verhältnisse der flächenbezogenen Gewichtung unterliegen. Anzahlgewichtet sind die kornförmigen Partikel deutlich präsenter. Die Darstellung umfasst sämtliche Faserstoffvarianten und abgesehen von den Partikelklassen FB und LF bei der Holzart Fichte im TMP-Verfahren (Abbildung 7.43a) und der Partikelklassen FB und KF bei der Holzart Buche im RMP-Verfahren (Abbildung 7.43d), sind die Unterschiede zwischen den Mahlscheibenmustern und Aufschlusstemperaturen überraschenderweise eher als gering einzustufen.

Ein differenzierteres Bild ergibt sich aus Abbildung 7.44. Hier sind die Flächenanteile der Partikelklassen als gestapelte Balkendiagramme dargestellt. Die **Lage der Mittelwerte** der einzelnen Partikelklassen unterscheidet sich überwiegend signifikant, wie aus Tabelle 7.14 und Tabelle 7.15 hervorgeht. Das ist durch den großen Umfang der Stichproben auch zu erwarten. Ähnlich wie die Medianwerte bei der Luftstrahl-Prüfsiebung treten auch in der Bildanalyse die größten Unterschiede bei der Holzart Fichte und der Aufschlusstemperatur 135°C auf. Hier sticht die Mahlscheibe 3 mit einem vergleichsweise hohen Langfaseranteil bei geringem Kurzfaser-, kornförmigen und Faserbündelanteil heraus. Bezüglich des Mahlscheibenmusters 5 ist anzumerken, dass der Faserbündelanteil bei der Holzart Fichte und den Aufschlusstemperaturen 150°C und 175°C relativ hoch ist. Die Konstruktion der Mahlscheibe zielt durch die Krümmung des Rotors (Tabelle 6.6) darauf ab, lange, dünne Faserbündel zu erzeugen. Dies bestätigt die Annahme, dass der Rotor einen größeren Einfluss auf die Fasererzeugung hat als der Stator. Die Untersuchungen von Alahutala et al. (2004) zur Faserstoffdichte im Mahlsplatt mittels optischer Messungen, untermauern diese Beobachtung. Demnach transportiert der Rotor hauptsächlich die Faserstoffe in Richtung Peripherie und es findet keine gleichmäßige Verteilung zwischen Rotor und Stator statt.

Die Flächenanteile der **RMP-Faserstoffe** aus der Holzart Fichte in Abbildung 7.45a weisen praktisch keine Unterschiede zwischen den beiden Temperaturen auf. Bei der Holzart Buche in Abbildung 7.45b sind dagegen weniger Faserbündel zu Lasten hauptsächlich höherer Anteile an Kurzfasern und kornförmiger Partikeln zu finden. Wenderdel et al. (2016a, S. 28) kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Dies könnte ein Hinweis auf den niedrigeren Erweichungsbereich der Holzart Buche sein, der, wie weiter oben ausgeführt, bereits bei 80°C bis 90°C beginnt. Allerdings entsteht hierbei ein Anteil von annähernd 50 % an kurzfasrigen und kornförmigen Partikeln.

Abbildung 7.44: Flächenanteile der Partikelklassen im TMP-Verfahren. **a, c, e**, Faserstoffe aus der Holzart Fichte, aufsteigend nach Aufschluss Temperatur sortiert. **b, d, f**, Faserstoffe aus der Holzart Buche, aufsteigend nach Aufschluss Temperatur sortiert.

Tabelle 7.14: Statistische Auswertung in Ergänzung zu den Abbildungen 7.44a,c,e (Faserstofferzeugung mit der Holzart **Fichte**). Die Asteriske indizieren das Signifikanzniveau.

135 °C					150 °C				175 °C			
M.	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2	****				****				****			
3	****	****			****	****			****	****		
4	****	****	****		****	****	****		****	****	****	
5	****	****	****	****	ns	****	****	****	****	****	****	****

Signifikanz: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *; > 0,05 ns (nicht signifikant)
M. = Mahlscheibenmuster

Tabelle 7.15: Statistische Auswertung in Ergänzung zu den Abbildungen 7.44b,d,f (Faserstofferzeugung mit der Holzart **Buche**). Die Asteriske indizieren das Signifikanzniveau.

135 °C					150 °C				175 °C			
M.	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2	****				****				****			
3	****	****			****	****			ns	****		
4	****	****	****		****	****	****		****	****	****	
5	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****

Signifikanz: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *; > 0,05 ns (nicht signifikant)
M. = Mahlscheibenmuster

Abbildung 7.45: Flächenanteile der Partikelklassen im RMP-Verfahren. **a**, Faserstoffe aus der Holzart Fichte. **b**, Faserstoffe aus der Holzart Buche. Mahlscheibenmuster 6.

Abgesehen von den Buchen-Faserstoffen überwiegt bei allen Mahlscheiben und Aufschlussstemperaturen die Partikelklasse der Faserbündel bei den Flächenanteilen. Angesichts der eher geringen Unterschiede in den Flächenanteilen der anderen Partikelklassen kann deshalb vermutet werden, dass die Faserbündel einen Einfluss auf die maßgebliche Produkteigenschaft Wärmeleitfähigkeit haben. Im Gegensatz zu den anderen Partikelklassen sind die Faserbündel nicht in der Länge und Dicke definiert. Eine genauere Betrachtung durch weitere Differenzierung der Verteilungssummen innerhalb dieser Partikelklasse soll im Weiteren dazu dienen, funktionelle Zusammenhänge aufzudecken. In Abbildung 7.46 ist beispielhaft die **Verteilungssumme der Elongation** der Faserbündel dargestellt. Daran wird deutlich, dass innerhalb der Klassen eine Größenverteilung der Partikel durch die Länge und die Dicke vorliegt. Diese Erkenntnis dient im Weiteren zur Berechnung zusätzlicher Kennwerte.

Den Untersuchungen von Wenderdel (2015, S. 88) zufolge bestehen Faserbündel in Faserstoffen aus der Holzart Kiefer (*Pinus sylvestris*) vor allem aus Frühholz. Die Einzelfasern bestehen zum größten Teil aus Spätholz. Mott et al. (2002) kommen nach Untersuchungen der Holzart Kiefer (*Pinus taeda*) allerdings zu dem Schluss, dass vor allem das Frühholz im Feinanteil von MDF-Faserstoff zu finden ist. Wenderdel et al. (2016a) erklären den höheren Feinstoffanteil bei Buchen-Faserstoffen durch die Zerkleinerung von Gefäßen im TMP-Verfahren.

Abbildung 7.46: Beispielhafte Darstellung einer Verteilung innerhalb einer Partikelklasse anhand der flächengewichteten Verteilungssumme Q_2 der Elongation in der Partikelklasse Faserbündel (Mahlscheibe 1, Holzart Fichte, 135 °C).

Bei der Untersuchung der Effekte von Mahlscheiben und Aufschlussstemperaturen auf die Beschaffenheit von Faserstoffen wurde die natürliche geometrische Variabilität der Zellarten berücksichtigt. Die Anatomie und Morphologie der Holzarten ist prozesstechnisch von Bedeutung und hat Einfluss auf die daraus hergestellten Produkte. In der Holzwerkstoffindustrie sind Laubhölzer für die Produktion von MDF seit längerer Zeit Stand der Technik (Roffael et al. 1994a). Der Einsatz von Fichtenholz in der Holzfaserdämmstoffherstellung ist Stand der Technik. Die Frage, inwiefern sich Buchenholz, dessen Struktur und Anatomie divergiert, vom physikalisch-technologischen

Standpunkt aus für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen eignet, wird durch die Untersuchungen in Abschnitt 7.6 beantwortet. Dort wird ebenfalls abschließend auf Zusammenhänge zwischen der Beschaffenheit der Faserstoffe und der Wärmeleitfähigkeit eingegangen.

Bei der übergeordneten Betrachtung der quantitativen Bildanalyse sollen an dieser Stelle **Einflüsse und Fehlerquellen** diskutiert werden. Die FibreShape-Software ist nicht in der Lage, über Kreuz liegende Partikel zu identifizieren und zu analysieren. Solche Agglomerate lassen sich mit der angewendeten Präparationsmethode nicht vermeiden und stellen allgemein eine Problematik in der Analyse von Faserstoffen dar, wie auch Benthien et al. (2017) anmerken. Der morphologische Filterparameter „Convexity“ (ISO 9276-6: Solidität) beschreibt das Verhältnis zwischen der Fläche der konvexen Hülle (Ummantelung) und der Projektionsfläche eines Partikels. Dadurch wird der Filterparameter $1/\text{Convexity}$ „mächtig“, in der Selektion von Partikelformen (vgl. Abbildung 6.6). Mit steigenden Maximalwerten werden zunehmend über Kreuz liegende Fasern und in der Präparation nicht aufgelöste Agglomerate in die Auswertung einbezogen. Mit steigenden Minimalwerten werden kornförmige sowie nicht gekrümmte, kompakte Partikel aus der Analyse ausgeschlossen. In Abbildung 7.47 wird die Problematik veranschaulicht.

Bei der quantitativen Bildanalyse wird in der Regel immer ein **Kompromiss** zwischen einer möglichst detaillierten Abbildung der Partikel durch eine geringe Pixelgröße und der Notwendigkeit, eine statistisch relevante Partikelzahl zu erfassen, eingegangen. Das in der vorliegenden Arbeit angewendete Analyseverfahren unterscheidet sich von Untersuchungen mit dem FibreShape-System nach Imken et al. (2021), Plinke et al. (2016) und Schirp et al. (2015) durch die höhere Auflösung von 2400 dpi (gegenüber 1200 dpi) und die Verwendung von Glasplatten für die Faserstoff-Präparation (gegenüber Overhead-Folie). Durch die höhere Auflösung konnte die Pixelgröße in den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit auf $10,6\text{ }\mu\text{m}$ halbiert und somit die Erfassung der kornförmigen und kurzfasrigen Partikeln sowie der Feinheit verbessert werden. Insbesondere liegt die mittlere Feinheit einzelner Tracheiden der Holzart Fichte bei $30\text{ }\mu\text{m}$ und die mittlere Feinheit von Librifasern bei $21\text{ }\mu\text{m}$ (vgl. Tabelle 2.1). Zudem wurde durch die Verwendung von Glasplatten der Einfluss von Defekten in der Overhead-Folie, wie Lunker, Dichteunterschiede und Schattenbildung, vermieden. Voruntersuchungen und Nullmessungen zeigten, dass diese Defekte in der Analyse relevant sind, da sie als Holzpartikel erfasst werden.

Bezüglich der Varianz bzw. Wiederholgenauigkeit ist darauf zu achten, den Bildflächenanteil der Partikel konstant zu halten, denn bei Bildflächenanteilen über 3 % beginnt die Messung „schief“ zu werden. Weitere mögliche Fehlerquellen bei der Analyse eines Einzelbildes sind in DIN ISO 9276-6:2012-01 (2012) aufgeführt. An dieser Stelle sei noch darauf hingewiesen, dass der Schwellwert für die Graustufen innerhalb des Bildes nur manuell ausgewählt werden konnte und daher für alle Messungen gleich gehalten wurde. Durch den Schwellwert wird die Kontur auf der einen Seite des Grenzwertes als Hintergrund betrachtet und somit von der Erfassung ausgeschlossen. Das bedeutet, dass nur durch die Einstellung des Schwellwertes erheblich **Einfluss auf die Charakterisierung** von Dispersitätseigenschaften genommen wird. Ohne Informationen zu den Algorithmus-Parametern, den morphologischen Parametern und dem Schwellwert sind Ergebnisse aus der quantitativen Bildanalyse nicht vergleichbar.

Die **flächenbezogene Gewichtung** wurde einer anzahl- und volumenbezogenen Gewichtung vorgezogen. Nach DIN ISO 9276-6:2012-01 (2012) bietet die Projektionsfläche einen robusten zweidimensionalen Parameter, der direkt bestimmt werden kann. Die der quantitativen Bildanalyse als individuelle Zählmethode angemessene Gewichtung ist die anzahlbezogene Gewichtung. Hierbei werden allerdings die kornförmigen Partikel überrepräsentiert und führen regelmäßig zu einer bimodalen Häufigkeitsverteilung. Das macht die Analyse anhand von Verteilungssummen ungenau. Eine volumenbezogene Gewichtung erfordert eine dreidimensionale Erfassung der

Abbildung 7.47: Ausschnitte aus einer, mit der FibreShape-Software analysierten, Aufnahme eines Fichtenfaserstoffes. Die grüngefärbten Fasern wurden durch die FibreShape-Software akzeptiert und die schwarzgefärbten nicht. **a**, Auswahl Filterparameter 1/Convexity: Minimum: 0, Maximum: 1,5. Die Auswahl selektiert über Kreuz liegende Partikel weitgehend. **b**, Auswahl Filterparameter 1/Convexity: Minimum: 1, Maximum: 2,5. Das große, nicht repräsentative Agglomerat wird beispielsweise als ein Partikel erfasst und verzerrt die Analyse. Kein Maßstab verfügbar.

Partikel. Die Software FibreShape berechnet zwar aus den zweidimensionalen Bilddaten das Volumen über ein Ellipsoid-Modell. Diese Vorgehensweise ist allerdings fehlerbehaftet. Außerdem werden dadurch wiederum die Faserbündel überproportional gewichtet, denn diese weisen keinen kreisrunden Querschnitt auf.

Auch die **Prozessführung** hat einen Einfluss auf die Dispersitätseigenschaften der Faserstoffe. Der Differenzdruck beeinflusst unter anderem die Verweilzeit der Faserstoffe im Mahlpalt (Miles & May 1990). In der Versuchsdurchführung wurde darauf geachtet, dass der Druck im Mahlraum durch die manuelle Bedienung des Blasventils knapp unter dem Druck des Kochers gehalten wurde. Ek et al. (2009, S. 82) und Brombacher et al. (2016) stellten weiterhin fest, dass bei einer Verweilzeit der Hackschnitzel im Kocher von 2 min die geringsten Feinheiten und Längen in der Partikelgrößenverteilung beobachtet werden. Wohingegen bei 3 min bis 4 min und 6 min Verweilzeit im Kocher kein wesentlicher Unterschied bestand.

7.5.4 Effizienz in der Faserstoffherzeugung

Über die Charakterisierung von Dispersitätseigenschaften hinaus bietet die Methode der quantitativen Bildanalyse eine Möglichkeit, die Effizienz in der Faserstoffherzeugung zu berechnen und vergleichend darzustellen. Nach Lamb (1960) kann die Erzeugung von Faserstoffen als eine **Vergrößerung der Oberfläche** des Holzes erachtet werden. Die Effizienz der Mahlscheiben ist folglich ein Maß dafür, wie viel elektrische Energie für die Vergrößerung der Oberfläche des Holzes aufgebracht wird. Für die Berechnung der Oberfläche des Holzes bzw. der Fasern bietet sich die gefüllte Fläche der Partikel (AREAF nach Schmid et al. (2020)) aus der Bildanalyse an. Damit wird der flächenäquivalente Durchmesser (CircDiam nach Schmid et al. (2020)) einer Kugel mit gleicher Projektionsfläche wie die des Partikels berechnet. Nach Leschonski (1984) und DIN ISO 9276-6:2012-01 (2012) wird dieser 2D-Deskriptor als idealer Normalisierungsparameter (Größenparameter zur Normalisierung von Formdeskriptoren) beschrieben.

Die Berechnung der Effizienz erfolgt nach Gleichung 7.10 mit dem Quotienten aus flächenequivalentem Durchmesser und Partikelanzahl als durchschnittliche Partikeloberfläche nach Gleichung 7.9.

$$A_p = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (7.9)$$

A_p durchschnittliche Partikeloberfläche
 C_i flächenäquivalenter Durchmesser der Partikel
 n Anzahl der Partikel

$$\eta = \frac{A_p}{P_{spez}} \quad (7.10)$$

η Effizienz der Mahlscheibenmuster in der Faserstoffherzeugung
 A_p durchschnittliche Partikeloberfläche
 P_{spez} spezifische elektrische Leistungsaufnahme (SEL)

In Abbildung 7.48 ist die Effizienz der Mahlscheibenmuster in den einzelnen Aufschlussvarianten vergleichend dargestellt. Der **Erkenntnisgewinn** liegt in der Feststellung, dass die Effizienz der Faserstoffherzeugung von der Konstruktion der Mahlscheiben, der Aufschluss temperatur und der verwendeten Holzart abhängt. Pearson (1990, S. 19) fügt dem noch einen Einfluss des Durchsatzes und der Konsistenz hinzu. Die Faserstoffherzeugung mit der Holzart Buche ist, gemessen an der Oberflächenvergrößerung zum Energieeinsatz, generell weniger Effizient als die Faserstoffherzeugung mit der Holzart Fichte. Dies kann als Hinweis angesehen werden, dass die Mahlscheibenmuster für die Zerkleinerung von Buchenholz weiter optimiert werden können. Hinweise für die Optimierung bietet die Konstruktion des Mahlscheibenmusters 2 bei 135 °C und die Konstruktion des Mahlscheibenmusters 3 bei 175 °C.

In der Effizienz ragt bezüglich der Holzart Fichte das **Mahlscheibenmuster 3** heraus. Interessanterweise nimmt die Effizienz hier mit steigender Aufschluss temperatur ab. Diese Beobachtung passt zu dem ermittelten hohen Langfaser-Flächenanteil aus Abbildung 7.44. Anscheinend ist das Mahlscheibenmuster 3 sowohl für die Faserstoffherzeugung bei niedrigen als auch bei hohen Aufschluss temperaturen geeignet. Einen Erklärungsansatz für dieses Verhalten bietet die bereits diskutierte umlaufende Unterbrechung der Stege zur Entschärfung des Temperaturmaximums auf der Mahlbahn (Atack et al. 1989). Dem Einsatzgebiet in der MDF-Herstellung gemäß weist das Mahlscheibenmuster 4 eine hohe Effizienz in dem dort üblichen Temperaturbereich auf. Im RMP-Verfahren ist die Effizienz grundsätzlich noch relativ gering. Hier sind weitere Entwicklungsschritte basierend auf diesem erstmalig getesteten Mahlscheibenmuster notwendig.

Leißner (2015, S. 9) zufolge weisen Zerkleinerungsprozesse im Allgemeinen einen geringen energetischen Wirkungsgrad auf. Die vorliegenden Untersuchungen belegen, dass über die Prozessführung und die Konstruktion von Mahlscheiben die Effizienz der Zerkleinerung gesteigert werden kann. Für **weitere Untersuchungen** zu diesem Sachverhalt ist zu empfehlen, die Methode der quantitativen Bildanalyse dahingehend anzupassen, sodass eine massenbezogene Berechnung der Effizienz ermöglicht wird. Im vorliegenden Fall konnte die Vergrößerung der Oberfläche nicht sicher der Gesamtmasse der Partikel zugeordnet werden und es musste auf die Partikelanzahl zurückgegriffen werden.

Abbildung 7.48: Vergleichende Darstellung der Effizienz der Mahlscheibenmuster in der Faserstoffherzeugung, gemessen an der durchschnittlichen Partikeloberfläche. Dargestellt ist die Lage des arithmetischen Mittels innerhalb der Standardabweichung. TMP-Verfahren: **a**, Mahlscheibenmuster 1. **b**, Mahlscheibenmuster 2. **c**, Mahlscheibenmuster 3. **d**, Mahlscheibenmuster 4. **e**, Mahlscheibenmuster 5. RMP-Verfahren: **f**, Mahlscheibenmuster 6. $n=4$.

7.5.5 Mikroskopische Untersuchungen an den Faserstoffen

Abschließend zu den Untersuchungen zur Beschaffenheit von Faserstoffen soll ein **qualitativer Vergleich** die Ausführungen ergänzen und die theoretischen Betrachtungen veranschaulichen. Im Folgenden sind mikroskopische Aufnahmen der labortechnisch erzeugten TMP- und RMP-Faserstoffe gemeinsam mit Holzschliff, Holzfaserdämmstoffen, MDF- und Zellstoffen dargestellt. Durch einen Vergleich sollen die bisherigen Untersuchungen in den Kontext der industriellen Faserstoffherzeugung eingeordnet werden. Dazu sind die wichtigsten, in den Bildausschnitten sichtbaren, qualitativen Merkmale der Faserstoffe in den Bildunterschriften knapp wiedergegeben. Um die chemischen Oberflächeneigenschaften, die Zugänglichkeit der inneren Struktur und den Grad der Fibrillierung der Fasern sichtbar zu machen, wurde eine zweifarbige **differentielle Färbemethode** nach Simon (1950) angewendet (Simons' stain, siehe Abschnitt 4.3). Den Ergebnissen von Kwok et al. (2017) folgend, wurde anstelle des nicht mehr verfügbaren Farbstoffs Direct Orange 15 der gleichwertige Farbstoff Direct Yellow 11 verwendet. Auf Grundlage der Untersuchungen von Fernando & G. Daniel (2010) zur Quantifizierung mechanischer Beanspruchungen wurde die Färbemethode auf die Faserstoffe der vorliegenden Arbeiten angewendet, um mögliche Unterschiede zwischen den Mahlscheibenmustern und Aufschlusstemperaturen zu identifizieren. In diesem Zusammenhang muss zuerst festgehalten werden, dass die Färbemethode auch für die Färbung von **Buchen-Faserstoffen geeignet** ist, was bislang nicht beschrieben wurde.

In Ergänzung zur manuellen Quantifizierung nach Fernando & G. Daniel (2010) konnte in Vorversuchen gezeigt werden, dass eine quantitative Auswertung mittels Bildanalyse möglich ist und dadurch eine größere Anzahl Partikel erfasst wird. Zum einen bietet die Software FibreShape die Möglichkeit, Farbwerte zu analysieren, zum anderen eignet sich auch frei verfügbare Software wie ImageJ zur **Quantifizierung der Farbanteile**. Für die vorliegende Arbeit wurden allerdings durch die Bildanalyse keine wesentlichen neuen Erkenntnisse zur Beschaffenheit der Faserstoffe gefunden. Im Hinblick auf die Zielsetzung wurden diese Ergebnisse nicht in die Ausarbeitung aufgenommen. Letztendlich bietet die Färbung dennoch einen guten Kontrast für das Mikroskopieren. Eine weitere interessante Färbemethode zur lichtmikroskopischen Charakterisierung von Faserstoffen beschreiben Srebotnik & Messner (1994). Damit könnten Ligninanteile auf der Oberfläche der Fasern sichtbar gemacht werden.

Der mikroskopische Vergleich von labortechnischen Faserstoffen mit industriellen Papierstoffen in Abbildung 7.49 ist aufschlussreich hinsichtlich der qualitativen Beschaffenheit. In den labortechnischen Faserstoffen sind, im Vergleich zu den Papierstoffen, praktisch keine desintegrierten und fibrillierten Bestandteile sichtbar. Insbesondere im Vergleich mit dem TMP-Papierstoff aus der 1. Refinerstufe (Abbildung 7.49 d) wird deutlich, dass die Zellstruktur der labortechnischen Faserstoffe im Gegensatz zu dem Papierstoff intakt ist. In den Papierstoffen ist die Primärwand und die S_1 -Schicht teilweise vollständig flöckchen- und plättchenförmig abgelöst. Die S_2 -Schicht delaminiert bändchenförmig und wird als externe Fibrillierung sichtbar (Koran 1970; Fernando & G. Daniel 2004). Allerdings ist eine gewisse Latenz durch das Verdrehen und Kräuseln der Fasern sichtbar. Die spezifische elektrische Leistungsaufnahme zur Herstellung des Papierstoffes lag bei rund $660 \text{ kWh/t}_{\text{atro}}$, die der labortechnischen Faserstoffe zwischen rund $180 \text{ Wh/kg}_{\text{atro}}$ und $490 \text{ Wh/kg}_{\text{atro}}$.

In Abbildung 7.50 werden die **anatomischen Unterschiede** zwischen den Holzarten Fichte und Buche sichtbar. Die faserartigen Bestandteile der Buche sind feiner und kürzer als die der Fichte. Zudem sind die Tracheen in der Holzart Buche zahlreich vertreten. Insbesondere in Abbildung 7.50a und Abbildung 7.50b ist die **Latenz** durch gekrümmte Fasern und agglomerierte Fibrillen gekennzeichnet. Ein Vergleich der labortechnischen Faserstoffe mit industriellen Fa-

serstoffen im selben Aufschlussstemperatur-Bereich in Abbildung 7.51 macht deutlich, dass sich die Morphologie der industriellen Faserstoffe, abgesehen von der Holzart, nicht wesentlich von den labortechnischen unterscheidet. Zwischen der Aufschlussstemperatur von 135 °C und 175 °C bestehen markante Unterschiede in den Buchen-Faserstoffen, wie aus Abbildung 7.52 hervorgeht. Bei der niedrigeren Aufschlussstemperatur treten vermehrt Bruchstücke auf und die Tracheen werden zerkleinert. Die **RMP-Faserstoffe** in Abbildung 7.53 unterscheiden sich deutlich in ihrer Morphologie von den TMP-Faserstoffen. Es sind hauptsächlich kurze, unregelmäßige und teils stark aufgefaserter Faserbündel sowie geknickte, gebrochene und gekrümmte Fasern sichtbar. Die Faserbündel erscheinen aufgrund der geringen Lichtdurchlässigkeit relativ dick zu sein.

Abbildung 7.49: Mikroskopische Aufnahmen von Faserstoffen: Qualitativer Vergleich labortechnisch erzeugter Faserstoffe mit industriell erzeugten Faserstoffen aus der Papierproduktion. **a**, Mahlscheibenmuster 1, Fichte, 135 °C: Zahlreiche Bruchstücke von Tracheiden und Faserbündeln. **b**, Holzschliff, ungebleicht, Fichte: Stark desintegrierte und fibrillierte Tracheiden und Bruchstücke. **c**, Mahlscheibenmuster 3, Fichte, 135 °C: Relativ intakte Tracheiden. **d**, TMP 1. Refinerstufe, 145 °C Fichte: Intakte und delaminierte, fibrillierte Tracheiden. **e**, Mahlscheibenmuster 5, Fichte, 135 °C: Fibrillierte Faserbündel und Agglomerate. **f**, BCTMP, Fichte: Relativ intakte Tracheiden und Feinstoff. Die Aufnahmen liegen in hoher Auflösung vor. Zur detaillierten Betrachtung eignet sich die Vergrößerungsfunktion des PDF-Readers.

Abbildung 7.50: Mikroskopische Aufnahmen von Faserstoffen: Qualitativer Vergleich labortechnisch erzeugter Faserstoffe aus Fichten- und Buchenholz. **a**, Mahlscheibenmuster 1, Fichte, 150 °C: Teilweise desintegrierte Tracheiden, Bruchstücke und Agglomerate aus Fibrillen. **b**, Mahlscheibenmuster 1, Buche, 150 °C: Bruchstücke von Parenchym und Tracheen sowie intakte Fasern. **c**, Mahlscheibenmuster 3, Fichte, 150 °C: Faserbündel und Tracheiden. **d**, Mahlscheibenmuster 3, Buche, 150 °C: Relativ intakte Fasern sowie Tracheen. **e**, Mahlscheibenmuster 5, Fichte, 150 °C: Teilweise angeschnittene Tracheiden. **f**, Mahlscheibenmuster 5, Buche, 150 °C: Feine Bruchstücke und Faserbündel. Die Aufnahmen liegen in hoher Auflösung vor. Zur detaillierten Betrachtung eignet sich die Vergrößerungsfunktion des PDF-Readers.

Abbildung 7.51: Mikroskopische Aufnahmen von Faserstoffen: Qualitativer Vergleich labortechnisch erzeugter Faserstoffe mit industriellen Holzfaserdämmstoff- und MDF-Faserstoffen. **a**, Mahlscheibenmuster 1, Fichte, 175 °C: Teilweise desintegrierte Tracheiden, Bruchstücke und Agglomerate aus Fibrillen. Die blassblaue Färbung weist auf eine relativ starke mechanische Beanspruchung hin. **b**, Holzfaserdämmstoff, Kiefer: Dicke Faserbündel, separierte Tracheiden und Bruchstücke. **c**, Mahlscheibenmuster 3, Fichte, 175 °C: Faserbündel, separierte Tracheiden und vereinzelte Bruchstücke. **d**, Holzfaserdämmstoff, Fichte: Faserbündel, separierte Tracheiden und vereinzelte Bruchstücke. **e**, Mahlscheibenmuster 5, Fichte, 175 °C: Faserbündel, separierte Tracheiden und Bruchstücke. **f**, MDF, Kiefer: Schmale Faserbündel, separierte Tracheiden und Bruchstücke. Die Aufnahmen liegen in hoher Auflösung vor. Zur detaillierten Betrachtung eignet sich die Vergrößerungsfunktion des PDF-Readers.

Abbildung 7.52: Mikroskopische Aufnahmen von Faserstoffen: Qualitativer Vergleich labortechnisch erzeugter Faserstoffe aus Buchenholz. **a**, Mahlscheibenmuster 1, Buche, 135 °C: Zahlreiche Bruchstücke sowie verdrehte Fasern. **b**, Mahlscheibenmuster 1, Buche, 175 °C: Zahlreiche dickere und an den Fasern agglomerierte Bruchstücke. **c**, Mahlscheibenmuster 3, Buche, 135 °C: Überwiegend Bruchstücke. **d**, Mahlscheibenmuster 3, Buche, 175 °C: Intakte Fasern und Tracheen neben größeren Bruchstücken. **e**, Mahlscheibenmuster 5, Buche, 135 °C: Gehacktes von der Buche. **f**, Mahlscheibenmuster 5, Buche, 175 °C: Intakte Fasern und Tracheen neben kleineren Bruchstücken. Die Aufnahmen liegen in hoher Auflösung vor. Zur detaillierten Betrachtung eignet sich die Vergrößerungsfunktion des PDF-Readers.

Abbildung 7.53: Mikroskopische Aufnahmen von Faserstoffen: Qualitativer Vergleich labortechnisch erzeugter Faserstoffe im RMP-Verfahren sowie mikroskopische Aufnahmen von Zellstoffen. **a**, Mahlscheibenmuster 6, Buche, 20 °C: Kurze, unregelmäßige Faserbündel und Agglomerate. **b**, Mahlscheibenmuster 6, Buche, 100 °C: Unregelmäßige, aufgefaserte Faserbündel und Agglomerate. **c**, Mahlscheibenmuster 6, Fichte, 20 °C: Geknickte, gebrochene Tracheiden und Bruchstücke. **d**, Mahlscheibenmuster 6, Fichte, 100 °C: Kurze, angeschnittene, aufgefaserte Faserbündel. **e**, NBSK, Fichte: Bändchenförmige, kollabierte Tracheiden. Die gelbe Färbung ist auf die mechanische Beanspruchung in der LC-Mahlung zurückzuführen. **f**, Sulfite-Zellstoff, Nachsortierung, Buche 35 %, Fichte 65 %: Bändchenförmige, kollabierte Tracheiden neben Buchenfasern und zahlreichen Bruchstücken. Die gelbe Färbung ist auf die mechanische Beanspruchung in der LC-Mahlung zurückzuführen. Die Aufnahmen liegen in hoher Auflösung vor. Zur detaillierten Betrachtung eignet sich die Vergrößerungsfunktion des PDF-Readers.

7.6 Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe

7.6.1 Einführung

Die Wärmeleitfähigkeit ist die maßgebende Produkteigenschaft von Holzfaserdämmstoffen. Die Untersuchungen zur Faserstoffherzeugung und der Beschaffenheit der Faserstoffe sind für sich genommen zwar erkenntnisreich, ohne die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit allerdings nicht weiter zielführend. Mit der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit geht die bislang weitgehend ungeklärte Frage einher, welche Charakteristika Faserstoffe besitzen sollten, um eine möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit zu erzielen.

Das **Ziel der Untersuchungen** zur Wärmeleitfähigkeit ist deshalb, die Eigenschaften der Faserstoffvarianten, die mit unterschiedlichen Mahlscheibenmustern und Aufschlusstemperaturen erzeugt wurden, zu ermitteln. Dies gilt insbesondere für die niedrigen Aufschlusstemperaturen und das RMP-Verfahren. Zusätzlich wird der Versuch unternommen, Beziehungen zwischen technologischen Faktoren in der Prozessführung sowie den Dispersitätseigenschaften der Faserstoffe mit der Wärmeleitfähigkeit aufzudecken.

7.6.2 Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe

Zu Beginn der Untersuchungen wurde die Frage beantwortet, welche Wärmeleitfähigkeit industriell erzeugte Faserstoffe und Holzfaserdämmstoffe besitzen. Zusammen mit der Bestimmung der Ausgangs-Partikelgröße der Hackschnitzel und der Ziel-Partikelgröße der industriellen Faserstoffe (Abschnitt 7.1.2) sind diese Untersuchungen grundlegend für die labortechnische Faserstoffherzeugung. In Tabelle 7.16 sind die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit-Messung **industrieller Faser- und Holzfaserdämmstoffe** aufgelistet. Die niedrigste Wärmeleitfähigkeit besitzt die MDF-Faser. Den höchsten Wert weist die Holzfaserdämmstoff-Faser 1 auf.

Tabelle 7.16: Wärmeleitfähigkeit ausgewählter industrieller Holzfaserdämmstoffe.

Bezeichnung	Holzart	Wärmeleitfähigkeit λ_{10}^* W/(m·K)	Erweiterte Messunsicherheit W/(m·K)	Nennwert des Herstellers W/(m·K)
MDF-Faser	Kiefer	0,0348	0,0007	n.a.
Holzfaserdämmstoff-Faser 1	Fichte	0,0383	0,0007	n.a.
Holzfaserdämmstoff-Faser 3	Kiefer	0,0363	0,0007	0,038**
Holzfaserdämmstoff-Faser 4	Kiefer	0,0352	0,0007	0,038**
Zellulosedämmung	Altpapier	0,0374	0,0007	0,038
Holzfaserdämmstoff-Matte 1	Fichte	0,0356	0,0007	0,038
Holzfaserdämmstoff-Matte 2	Kiefer	0,0373	0,0007	0,038

* Feuchtekorrektur nach Normklima: 23 °C / 50 %.

** Einblasdämmung: Nennwert bezogen auf Rohdichte von 35 kg/m³ bis 45 kg/m³

Die Wärmeleitfähigkeit wurde an, aus Faserstoffen gebildeten, Vliesen mit einer Rohdichte von 50 kg_{atro}/m³, ermittelt. Durch die enthaltene Feuchte ist ein Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit zu erwarten (vgl. Abschnitt 5.3). Die notwendigen Ressourcen und Einrichtungen vorausgesetzt, ist es grundsätzlich empfehlenswert, die Wärmeleitfähigkeit an darrtrockenen Probekörpern zu bestimmen und die Werte anschließend auf Normklima umzurechnen. Entsprechende Vorgaben sind in der EN ISO 10456:2007 + AC:2009 (2010) beschrieben. Die Problematik, die bei einer **Wärmeleitfähigkeit-Messung an feuchten Probekörpern** auftritt, hängt mit den Probemitteltemperaturen 10 °C, 20 °C und 30 °C zusammen. An diesen Punkten stellt sich eine

unterschiedliche Ausgleichsfeuchte im Vergleich zum Einbauzustand der Probe ein. Insbesondere die Desorption kann zu Tauwasserkondensation an der Kühlplatte führen und einen Feuchtgradienten über den Probekörperquerschnitt hervorrufen. Dadurch kann die Messung ungenau und die Vergleichbarkeit beeinträchtigt werden. Im vorliegenden Fall handelt es sich allerdings nicht um eine industrielle Qualitätskontrolle, sondern es geht darum, Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit zwischen den Holzarten, Mahlscheibenmustern, Aufschlussstemperaturen und Aufschlussverfahren herauszuarbeiten. Zu diesem Zweck wurde eine Feuchtekorrektur angewendet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern.

Abbildung 7.54: Ermittlung einer Geradengleichung der Wärmeleitfähigkeit von Fichten-Faserstoff bei Probenmitteltemperaturen von 10 °C (λ_{10}), 20 °C (λ_{20}) und 30 °C (λ_{30}) in Abhängigkeit von der Holzfeuchte bei einer Rohdichte von 50 kg_{atro}/kg mittels linearer Regression.

Aus Wärmeleitfähigkeit-Messungen an Probekörpern aus Fichten-Faserstoffen mit 50 kg_{atro}/m³ und einer Holzfeuchte von 0 %, 5 % und 10 % konnte eine Geradengleichung ermittelt werden (Abbildung 7.54). Die lineare Regression liefert für die Probenmitteltemperaturen 10 °C, 20 °C und 30 °C eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit zwischen 3,7 % und 5,1 % pro 1 % Holzfeuchteänderung. Sonderegger & Niemz (2012) fanden für Holzfaserdämmstoff-Platten aus dem Nassverfahren mit einer Rohdichte von 130 kg_{atro}/m³ eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit zwischen 5,7 % und 6,0 % pro 1 % Holzfeuchteänderung für die Probenmitteltemperaturen 10 °C, 20 °C und 30 °C. Die Holzart ist bei Sonderegger & Niemz (2012) nicht angegeben. Für die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit erfolgt die **Feuchtekorrektur** daher mit dem Mittelwert der eigenen Messung als einer Änderung der Wärmeleitfähigkeit von 4,4 % pro 1 % Holzfeuchteänderung. Damit wurde die Feuchtedifferenz zwischen den Probekörpern auf die europäisch einheitlich geregelte Bezugsfeuchte von 23 °C / 50 % relative Luftfeuchte normiert. Die Ausgleichsfeuchte der Holzarten Buche und Fichte in dem Normklima wurde Böhner (1996) entnommen.

In Ergänzung zur Theorie der Wärmeleitung in Faserstoffen (Abschnitt 2.3.3) sind in Abbildung 7.55 Querschnitte von Holzfaserdämmstoffen dargestellt. Ein qualitativer Vergleich dient zur Einordnung der Ergebnisse zu den Wärmeleitfähigkeit-Messungen dahingehend, dass durch

die labortechnische, aerodynamische Faservliesbildung (Abbildung 7.55 a und b) scheinbar die **Faserorientierung** senkrecht zur Mattenebene stärker ausgeprägt ist, als bei den industriellen Holzfaserdämmstoff-Matten. Insbesondere die industrielle Holzfaserdämmstoff-Matte 1 in Abbildung 7.55 c weist überwiegend in Mattenebene orientierte Fasern auf. Dies könnte zu dem niedrigen Messwert der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10}=0,0356 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ beitragen.

Abbildung 7.55: Qualitativer Vergleich der Faserorientierung im Querschnitt labortechnischer und industrieller Holzfaserdämmstoffe. **a**, labortechnisch hergestellte Holzfaserdämmstoff-Matte aus Fichten-Faserstoff, Rohdichte $50 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$. **b**, labortechnisch hergestellte Holzfaserdämmstoff-Matte aus Buchen-Faserstoff, Rohdichte $50 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$. **c**, industrielle Holzfaserdämmstoff-Matte 1 aus Kiefern-Faserstoff, Rohdichte $60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$. **d**, industrielle Holzfaserdämmstoff-Matte 2 aus Kiefern-Faserstoff, Rohdichte $50 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$.

Die **Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit-Messungen** sind in Tabelle 7.17 aufgelistet. Teilweise wiesen die Faserstoffe eine höhere Schüttdichte als die für die Untersuchungen erforderliche Rohdichte auf. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Messungen zu gewähren, wurden diese Faserstoffe nicht in die Auswertung mit einbezogen. In der Tabelle ist zusätzlich noch die erweiterte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor 2) als größte wahrscheinliche Messabweichung des Wertes der Feuchtekorrektur angegeben, da die Wärmeleitfähigkeit-Messungen ohne Wiederholung durchgeführt wurden. Der Wert wurde der Messabweichungsanalyse des Herstellers entnommen (TAURUS Instruments AG 2018).

Tabelle 7.17: Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe mit Feuchtekorrektur nach Normklima.

Var.	Mahlscheibe	Holzart	Temp. °C	Wärmeleitfähigkeit Messwert λ_{10} W/(m·K)	Feuchtekorrektur* λ_{10} W/(m·K)	Erweiterte Messunsicherheit W/(m·K)
TMP-Verfahren						
1	1	Fichte	135	**	**	**
2	1	Fichte	150	0,0367	0,0375	0,0008
3	1	Fichte	175	0,0348	0,0346	0,0007
4	1	Buche	135	**	**	**
5	1	Buche	150	**	**	**
6	1	Buche	175	**	**	**
7	2	Fichte	135	0,0370	0,0373	0,0007
8	2	Fichte	150	0,0347	0,0347	0,0007
9	2	Fichte	175	0,0337	0,0338	0,0007
10	2	Buche	135	0,0384	0,0387	0,0008
11	2	Buche	150	0,0368	0,0373	0,0007
12	2	Buche	175	0,0348	0,0350	0,0007
13	3	Fichte	135	0,0360	0,0363	0,0007
14	3	Fichte	150	0,0357	0,0354	0,0007
15	3	Fichte	175	0,0341	0,0344	0,0007
16	3	Buche	135	0,0381	0,0384	0,0008
17	3	Buche	150	0,0358	0,0366	0,0007
18	3	Buche	175	0,0348	0,0342	0,0007
19	4	Fichte	135	0,0365	0,0367	0,0007
20	4	Fichte	150	0,0355	0,0358	0,0007
21	4	Fichte	175	0,0353	0,0350	0,0007
22	4	Buche	135	0,0398	0,0405	0,0008
23	4	Buche	150	0,0370	0,0370	0,0007
24	4	Buche	175	0,0344	0,0347	0,0007
25	5	Fichte	135	0,0362	0,0360	0,0007
26	5	Fichte	150	0,0345	0,0348	0,0007
27	5	Fichte	175	0,0332	0,0333	0,0007
28	5	Buche	135	0,0407	0,0411	0,0008
29	5	Buche	150	0,0365	0,0373	0,0007
30	5	Buche	175	0,0351	0,0356	0,0007
RMP-Verfahren						
1	6	Fichte	20	0,0383	0,0378	0,0008
2	6	Fichte	100	0,0368	0,0368	0,0007
3	6	Buche	20	0,0432	0,0421	0,0008
4	6	Buche	100	**	**	**

* Feuchtekorrektur nach Normklima: 23 °C / 50 %.

** Messung nicht möglich. Schüttdichte der Fasern größer 50 kg/m³.

Die Werte der Wärmeleitfähigkeit nach Feuchtekorrektur sind in Abbildung 7.56 übersichtlich dargestellt und ermöglichen somit einen Vergleich und die Diskussion der Ergebnisse. Aus Abbildung 7.56 geht hervor, dass die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Aufschluss-temperatur generell abnimmt. Das gilt für die Holzarten Buche und Fichte als auch für das TMP- und RMP-Verfahren gleichermaßen. Festzuhalten ist die niedrige Wärmeleitfähigkeit der **Fichtenholz-Faserstoffe** in den niedrigen Aufschluss-temperaturen 135 °C und 150 °C. Das trifft auch für die

Buchenholz-Faserstoffe zu, die mit den Mahlscheibenmustern 2 und 3 und einer Aufschluss-temperatur von 150 °C erzeugt wurden. Diese Faserstoffe sind mit den industriellen Faser- und Dämmstoffen in Tabelle 7.16 vergleichbar und müssten aller Voraussicht nach einen Nennwert von $\lambda_D=0,038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ erfüllen. Weiterhin konnte in den Untersuchungen bestätigt werden, dass **Buchenholz-Faserstoffe** in den Aufschluss-temperaturen von 150 °C und 175 °C vergleichbare Werte wie die Fichtenholz-Faserstoffe liefern. Lediglich mit der Aufschluss-temperatur von 135 °C liegt die Wärmeleitfähigkeit mit der untersuchten Rohdichte im Vergleich mit den anderen Aufschluss-temperaturen zu hoch. Als **Ergebnis der Untersuchungen** ist somit festzuhalten, dass auch mit niedrigen Aufschluss-temperaturen leistungsfähige Holzfaserdämmstoffe mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit hergestellt werden können.

Erste Versuche im **RMP-Verfahren** sprechen grundsätzlich dafür, dass mit diesem Verfahren ebenfalls Holzfaserdämmstoffe herstellbar sind. Die Wärmeleitfähigkeitswerte für die Fichten-Faserstoffe sind vielversprechend. Es scheint möglich zu sein, Faserstoffe auch ohne Erwärmung der Hackschnitzel mit Sattdampf zu erzeugen, die vergleichbare Werte zum TMP-Verfahren liefern. Allerdings gilt das im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht für die Holzart Buche.

In den vorliegenden Untersuchungen wurde die Wärmeleitfähigkeit an Faserstoffen ohne Zusatz-, Hilfs- und Klebstoffen ermittelt. Dies hätte den Umfang der Arbeit gesprengt. Inwiefern die Zugabe von Klebstoffen die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst ist nicht bekannt. Die Ergebnisse von Lee et al. (2019) zum Einsatz von Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (MUF), Phenol-Formaldehyd-Harz (PF), emulgierbarem MDI (eMDI) und Latex-Harz mit einem Bindemittelanteil von 35 % (!) legen nahe, dass zumindest die Art des Klebstoffes keinen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat. Brombacher et al. (2016) untersuchten ebenfalls die Wärmeleitfähigkeit an Faserstoffen (Holzart nicht angegeben). Im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit fanden die Autoren weder eine gesicherte Zu- noch eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit Aufschluss-temperaturen von rund 150 °C, 175 °C, 190 °C und 205 °C.

Abbildung 7.56: Vergleichende Darstellung der Wärmeleitfähigkeit der Faserstoffe nach Feuchtekorrektur. Die Fehlerbalken zeigen die erweiterte Messunsicherheit an. TMP-Verfahren: **a**, Mahlscheibenmuster 1. **b**, Mahlscheibenmuster 2. **c**, Mahlscheibenmuster 3. **d**, Mahlscheibenmuster 4. **e**, Mahlscheibenmuster 5. RMP-Verfahren: **f**, Mahlscheibenmuster 6.

7.6.3 Zusammenhänge zwischen Faserstoffherzeugung, Dispersitätseigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit

Es wurde eine **Korrelations-Matrix** erstellt, um insgesamt 27 Parameter von 29 Faserstoffen, an denen die Wärmeleitfähigkeit ermittelt wurde, zu untersuchen. In den, in Abschnitt 10.2 enthaltenen, Tabellen 10.1, 10.2, 10.3, 10.5, 10.4 und 10.6 wurden die weiter oben beschriebene Beschaffenheit der Faserstoffe berücksichtigt und darüber hinaus weitere Parameter untersucht. Neben den hierbei flächengewichteten Dispersitätseigenschaften wurde in Voruntersuchungen auch eine Auswahl an anzahlbezogener Gewichtung untersucht, die keine wesentlichen Unterschiede ergab.

Technologische Faktoren der Prozessführung

Unter den technologischen Faktoren der Prozessführung besitzen die Aufschlussstemperatur und die spezifische elektrische Leistungsaufnahme mit -0,72 und 0,81 bei der Holzart Fichte respektive -0,81 und 0,93 bei der Holzart Buche hohe Korrelationskoeffizienten. Der Zusammenhang mit der Temperatur geht aus Abbildung 7.56 hervor. In Abbildung 7.57 ist eine lineare Regression mit Bestimmtheitsmaß dargestellt. Hierin ist nicht dargestellt, aber zu beachten, dass eine niedrige spezifische elektrische Leistungsaufnahme durch das Mahlscheibenmuster und eine hohe Aufschlussstemperatur hervorgerufen wird. Bei der Holzart Fichte sind die Unterschiede zwischen den Mahlscheibenmustern deutlicher ausgeprägt, als bei der Holzart Buche. Dadurch kann das niedrigere Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,065$ begründet werden (Tabelle 10.1 und Tabelle 10.2).

Abbildung 7.57: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme (SEL). **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche.

Aus Abbildung 7.57 lassen sich weitere Erkenntnisse ziehen. Der Übersichtlichkeit halber sind keine Informationen zu den Aufschlussstemperaturen abgebildet. Der Darstellung zufolge, wurde die **niedrigste Wärmeleitfähigkeit** von 0,0332 W/(m·K) bei der Holzart Fichte mit dem

Mahlscheibenmuster 5 und der Aufschlusstemperatur 175 °C erzielt. Die spezifische elektrische Leistungsaufnahme lag bei 118 Wh/kg_{atro}. Die geringste spezifische elektrische Leistungsaufnahme von 80 Wh/kg_{atro} wurde mit dem Mahlscheibenmuster 3 bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,0347 W/(m·K) gemessen. Bei der Holzart Buche wurde die **niedrigste Wärmeleitfähigkeit** von 0,0347 W/(m·K) mit einer spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme von 90 Wh/kg_{atro} mit dem Mahlscheibenmuster 3 erzielt. Die Mahlscheibenmuster 1 und 4 erzielten ebenfalls niedrige Werte.

Beschaffenheit der Faserstoffe nach der Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit der Luftstrahl-Prüfsiebung wurden genutzt, um die ermittelten Dispersitätseigenschaften auf Korrelationen mit der Wärmeleitfähigkeit hin zu untersuchen. Bezüglich der **Holzart Fichte** wurden **keine signifikanten Korrelationskoeffizienten** identifiziert. Im Gegensatz zur Holzart Buche. Hier wurde der höchste Korrelationskoeffizient dem 97 %-Perzentil der Verteilungssumme zugeordnet (Tabelle 10.2). Einen ähnlich guten Wert erreicht auch die Partikelausdehnung der Buchen-Faserstoffe. Die Darstellung des Zusammenhangs in Abbildung 7.58 zeigt allerdings, dass diese Beobachtung kritisch betrachtet werden muss, da das Bestimmtheitsmaß bei der Holzart Buche $R^2 = 0,48$ beträgt. Lediglich das Mahlscheibenmuster 4 zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und dem 97 %-Perzentil auf, da dessen Werte nah an der Regressionsgeraden liegen. Bei der Holzart Fichte sind keine linearen Zusammenhänge zu erkennen.

Abbildung 7.58: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der 97 %-Perzentile. **a**, Holzart Fichte. **b**, Holzart Buche.

Beschaffenheit der Faserstoffe nach der Individualmethode quantitative Bildanalyse

Die umfangreichen Informationen aus den Untersuchungen zur Beschaffenheit der Faserstoffe nach der Individualmethode quantitative Bildanalyse sollen dazu genutzt werden, um weitere

Korrelationen zu finden. Bezüglich der **Holzart Fichte** muss festgehalten werden, dass **keine nennenswerten Zusammenhänge** zwischen den untersuchten Dispersitätseigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit aufgedeckt wurden. Lediglich Korrelationskoeffizienten mit mittlerem Signifikanzniveau finden sich zwischen spezifischer elektrischer Leistungsaufnahme und Feinstoffanteil sowie den Flächenanteilen der faserartigen und kornförmigen Partikel. Es scheint, als ob die angewendete Methode nicht dazu geeignet ist hier Zusammenhänge zwischen geometrischen Partikeleigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit herzustellen. Gründe dafür könnten sein, dass eine nicht repräsentative Auswahl an Partikeln erfasst oder die Auswahl der morphologischen Parameter die Informationen zu stark gefiltert haben. Es wäre auch möglich, dass systematische Fehler übersehen wurden. Weiterhin muss angemerkt werden, dass die Werte der Wärmeleitfähigkeit bei der Holzart Fichte eventuell zu dicht beieinander liegen, um signifikante Unterschiede zu identifizieren.

Abschließend bleibt anzumerken, dass letztendlich das durch die Faserstoffe ausgebildete dreidimensionale Netzwerk entscheidend für die Wärmeleitfähigkeit ist. Immerhin ist die Luft der Isolator im Dämmstoff. Je kleiner und feiner verteilt die Luftporen in einem Dämmstoff sind, desto geringer wird die Wärmeleitfähigkeit, wie der Vergleich mit Polyurethanschäumen oder extrudiertem Polystyrol zeigt. In diesem Zusammenhang ist die Untersuchung von Tran et al. (2013) interessant. Die Autoren beschreiben hierin eine Methode, um mittels **μ -CT-Aufnahmen** die Ausbildung von Poren in Holzfaserdämmstoffen zu untersuchen. In dieser Veröffentlichung liegt der Fokus zwar auf mechanischen Eigenschaften, es wäre jedoch vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit anzuraten, funktionale Zusammenhänge zwischen Dispersitätseigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit auf diesem Weg zu untersuchen.

8 Abschließende und zusammenfassende Diskussion mit Ausblick

8.1 Physikalisch-technologischer Erkenntnisgewinn zur Faserstofferzeugung für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen

Die Auswahl der **Holzarten Fichte und Buche** ist begründet durch den Fokus der Untersuchungen auf eine Nadel- und eine Laubholzart, die ein hohes Verwendungspotenzial durch eine hohe Verfügbarkeit besitzt. Mit der Holzart Fichte wurde die nach Varhimo & Tuovinen (1999) am besten für das TMP-Verfahren geeignete Spezies untersucht, die darüber hinaus den Stand der Technik in der Holzfaserdämmstoffherstellung repräsentiert. Die Holzart Buche stellt Knauf & Frühwald (2020) zufolge, mengenmäßig die wichtigste Laubholzsorte dar. Die divergierenden anatomischen Merkmale der Holzarten wurden außerdem dazu verwendet Charakteristika der Faserstoffe zu identifizieren, die in Beziehung mit der Faserstofferzeugung und Wärmeleitfähigkeit stehen. In diesem Zusammenhang muss die Einstufung von Buchenholzstäuben durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (2019) als karzinogen wirkend erwähnt werden. Obwohl das verursachende krebserzeugende Prinzip nicht identifiziert ist, muss der Einsatz von Buchenholz in der Holzfaserdämmstoffherstellung überprüft werden.

Darüber hinaus ist zu diskutieren, dass die vorliegende Arbeit keine weiteren normativen Untersuchungen zu Fragestellungen des Brandschutzes, der Wasseraufnahme sowie der mechanischen Eigenschaften von aus Fichten- und Buchenholz-Faserstoffen hergestellten Dämmstoffen umfasst. Insbesondere der Wasseraufnahme sollte, durch die Ausweitung auf die bislang wenig untersuchte und eingesetzte Holzart Buche und die niedrigen Aufschluss Temperaturen im TMP- und RMP-Verfahren, Beachtung in weiteren Forschungsvorhaben geschenkt werden. Die Ergebnisse von Schneider et al. (2000) zeigen, dass die Dickenquellung und Wasseraufnahme von MDF aus Fichtenholz-Faserstoffen mit einer Aufschluss Temperatur von 140 °C, gegenüber einer Aufschluss Temperatur von 180 °C, deutlich erhöht ist. Durch eine erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit könnte Brombacher et al. (2012) zufolge, die Wärmeleitfähigkeit erhöht und die Witterungsbeständigkeit von Holzfaserdämmstoffen herabgesetzt sein.

Die labortechnischen Untersuchungen zum Einsatz von unterschiedlichen Mahlscheiben im TMP- und RMP-Verfahren zeigen, dass Mahlscheibentests im Labormaßstab reproduzierbare Ergebnisse liefern. Voraussetzung dafür ist, dass **grundlegende Effekte der Prozessführung** auf die untersuchten Zielgrößen bekannt sind und in der Faserstofferzeugung berücksichtigt werden. Aus den Erkenntnissen zu den identifizierten Effekte konnten Konsequenzen für die weiteren Untersuchungen gezogen werden. Beispielsweise bedarf der Haupteffekt der Größe des Mahlspalts besonderer Beachtung bei der Versuchsdurchführung. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Vorgehensweise kann für weitere Untersuchungen herangezogen werden. Die labortechnisch erzeugten Faserstoffe sind mit industriell hergestellten Faserstoffen hinsichtlich der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme, der Dispersitätseigenschaften sowie der Wärmeleitfähigkeit

vergleichbar. Das angewendete Batch-Verfahren erwies sich als nicht nachteilig. Allerdings könnte ein kontinuierlicher Prozess mit einer Prozesszeit von mehr als 15 min möglicherweise die Wiederholgenauigkeit verbessern.

Ferner kann als Erkenntnisgewinn bezüglich der Forschungsfrage zum **Sorptionsverhalten von Fichten- und Buchenholz-Hackschnitzeln in Sattdampfatmosfera** festgehalten werden, dass die Massenzunahme mit der benötigten Dampfmenge assoziiert ist, die zur Erwärmung der Hackschnitzel benötigt wird. Die sich größtenteils durch die Absorption kondensierten Sattdampfs einstellende gemessene Holzfeuchte bzw. Konsistenz hängt durch die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser maßgeblich mit der Ausgangs-Holzfeuchte zusammen. Im Prozess der Faserstoffherzeugung ist es folglich möglich, die Holzfeuchte im Prozess der Faserstoffherzeugung gezielt über die Ausgangs-Holzfeuchte zu steuern. Eine niedrige Ausgangs-Holzfeuchte sollte zu einem geringeren Dampfverbrauch und einer geringeren Trocknerbeladung führen. Bei niedrigen Aufschlussstemperaturen und ohne Sattdampfdruck liegt die Konsistenz der Faserstoffe nach dem Aufschluss unter der Ausgangs-Holzfeuchte. Zu den Auswirkungen der Holzfeuchte auf die spezifische elektrische Leistungsaufnahme und die Beschaffenheit der Faserstoffe sind weitere Untersuchungen notwendig. Hierzu bieten sich Versuche mit Kalamitäts- und Käferholz oder Holz mit Trockenschäden an. Weiterhin konnte zur Entwässerung der Hackschnitzel durch die Stopfschnecke vor dem Druckbehälter des Refiners Forschungs- und Entwicklungsbedarf identifiziert werden. Die Holzfeuchte nach Entspannung des Sattdampfdrucks stellt sich auf ein einheitliches Niveau oberhalb der Ausgangs-Holzfeuchte der Hackschnitzel ein und ist unabhängig von dem untersuchten Sattdampfdruck. Das während der Erwärmung absorbierte Kondensat verdampft folglich nicht wieder vollständig. Die Beobachtungen zur Geschwindigkeit der Massenzunahme der Hackschnitzel lassen den Schluss zu, dass die Erwärmung unter labortechnischen Bedingungen ohne nennenswerte Verzögerung erfolgt. Der hydrostatische Sattdampfdruck sorgt für eine simultane Erwärmung der zugänglichen Volumina und Oberflächen. Begrenzend auf die Geschwindigkeit der Erwärmung können sich der hydraulische Widerstand und die Dicke der Hackschnitzel auswirken, infolge deren der Anteil an Wärmeleitung durch die Holzsubstanz ansteigt. Weitere Untersuchungen, welche das TMP- und RMP-Verfahren sowie deren Rohstoffe berücksichtigen, können dazu beitragen, diese Prozesse energietechnisch zu optimieren.

In Teilaspekt 3 wurden zur **Faserstoffherzeugung** fünf Mahlscheibenmuster im TMP-Verfahren und ein Mahlscheibenmuster im RMP-Verfahren untersucht. Hierbei ist festzuhalten, dass zu Beginn der Untersuchungen kein bewährter Stand der Technik zu erkennen war und keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu Mahlscheiben für Holzfaserdämmstoffe bekannt waren. Die Auswahlkriterien wurden deshalb breit gefächert, um die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Mahlscheibenmuster zu untersuchen. In Bezug auf die Forschungsfrage lassen sich aus dem Vergleich der Mahlscheibenmuster folgende Erkenntnisse ziehen. Es bestehen überwiegend **signifikante Unterschiede in der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme** der Mahlscheibenmuster. Diese Unterschiede nehmen mit steigender Aufschlussstemperatur ab. Zwischen den Mahlscheibenmustern bestehen weiterhin deutliche Unterschiede bezüglich der Leistungsschwankungen und der Leistungsspitzen. Hierzu konnte mit einem Mahlscheibenmuster festgestellt werden, dass eine Unterbrechung der Stege zur Vermeidung eines Temperaturmaximums auf der Mahlbahn und für die Strömung des zwischen den Mahlscheiben entstehenden Dampfes vorteilhaft ist. Insgesamt weist dieses Mahlscheibenmuster auch die geringste spezifische elektrische Leistungsaufnahme und die höchste Laufruhe auf. Generell lag bei der Holzart Buche die spezifische elektrische Leistungsaufnahme niedriger im Vergleich zur Holzart Fichte. Zu diesem Punkt ist anzumerken, dass insbesondere die Entwicklung von Mahlscheiben für die Faserstoffherstellung mit Laubholzsortimenten ein Optimierungspotenzial besitzt.

Ergänzend konnte bezüglich der Faserstofferzeugung für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen gezeigt werden, dass gegenüber dem Stand der Technik auch geeignete Faserstoffe bei niedrigeren Aufschlusstemperaturen erzeugt werden können, die eine geeignete Beschaffenheit für Holzfaserdämmstoffe aufweisen. Auch die **Machbarkeit des RMP-Verfahrens** kann zumindest für die Holzart Fichte bestätigt werden. Hier besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf bezüglich der Mahlscheiben, der Prozessführung und der Prozesstechnik.

In weiteren **Untersuchungen zum elektrischen und thermischen Energiebedarf** konnten Antworten auf die Fragestellung gefunden werden, welche Beziehungen zwischen der Holzfeuchte der Hackschnitzel und der Konsistenz Faserstoffe mit dem Energiebedarf in der Faserstofferzeugung bestehen. Die Abhängigkeit der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme von der Aufschlusstemperatur ist bei den Mahlscheibenmustern unterschiedlich ausgeprägt. Grundsätzlich nimmt die spezifische elektrische Leistungsaufnahme mit steigender Aufschlusstemperatur ab. Dieses Phänomen ist somit nicht ausschließlich auf das Erweichungsverhalten der Holzarten zurückzuführen. Es konnte gezeigt werden, dass die Höhe der Abnahme der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme über der Aufschlusstemperatur maßgeblich durch das Mahlscheibenmuster hervorgerufen wird. Damit muss das Modell von Asplund (1940a) überdacht werden. Darüber hinaus konnte anhand des Quotienten aus der durchschnittlichen Partikeloberfläche und der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme die Effizienz der Mahlscheibenmuster in der Faserstofferzeugung berechnet werden. Bezüglich der Zerkleinerungskinetik konnte kein Zusammenhang zwischen der Beanspruchungsfrequenz und der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme gefunden werden. Möglicherweise sind in der Konstruktion von Mahlscheiben andere Parameter, wie beispielsweise der Stegwinkel, ausschlaggebend. Diesbezüglich muss auch angemerkt werden, dass die Theorie zur Zerkleinerungskinetik von Mahlscheiben ausschließlich vor dem Hintergrund der Papierherstellung erstellt wurde und deshalb die Übertragung auf die Holzfaserdämmstoffherstellung erschwert ist.

Die Untersuchungen zum thermischen und elektrischen Energiebedarf zeigen weiterhin, dass mit einer Reduzierung des Anteils an thermischer Energie der Anteil an elektrischer Energie ansteigt und umgekehrt. Der **Gesamtenergiebedarf** liegt im TMP-Verfahren mit der Aufschlusstemperatur 175 °C tendenziell am niedrigsten. Insgesamt legen die Ergebnisse nahe, dass eine Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs mit dem RMP-Verfahren möglich ist, wenn der zwischen den Mahlscheiben entstehende und in den Kocher zurückströmende Dampf effektiv für die Erwärmung der Hackschnitzel verwendet wird. Die dadurch trockeneren Faserstoffe verursachen eine geringere Trocknerbelastung. Somit können in diesem Verfahren der prozesstechnisch aufwendige sowie investitions- und wartungsintensive thermische Energiebedarf für die Dampferzeugung und die Trocknung deutlich reduziert werden. Um diese Aussagen zu überprüfen sind weitere Untersuchungen notwendig.

In der **Charakterisierung der Beschaffenheit von Faserstoffen** für die Holzfaserdämmstoffherstellung erwiesen sich die Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung als auch die Individualmethode quantitative Bildanalyse gleichermaßen als geeignet, um Antworten auf die Eingangsformulierte Forschungsfrage zu finden. Mit beiden Methoden lassen sich die Unterschiede in den Dispersitätseigenschaften der Faserstoffe ermitteln. Insbesondere mit der Luftstrahl-Prüfsiebung konnte festgestellt werden, dass die Unterschiede bezüglich der Dispersitätseigenschaften mit steigender Aufschlusstemperatur kleiner werden. Abschließende **Erkenntnisse zu funktionalen Zusammenhängen** zwischen der Beschaffenheit der Faserstoffe und der Wärmeleitfähigkeit konnten mit den angewendeten analytischen und statistischen Methoden nicht herausgearbeitet werden. Mit der Luftstrahl-Prüfsiebung und der quantitativen Bildanalyse wurden keine signifikanten Korrelationen bei der Untersuchung von Fichtenholz-Faserstoffen gefunden. Die signifikanten

Korrelationen bezüglich der Buchenholz-Faserstoffe deuten darauf hin, dass hauptsächlich die Dicke bzw. Feinheit der faserartigen Partikel und Faserbündel die Wärmeleitfähigkeit beeinflussen. In der mikroskopischen Untersuchung der Faserstoffe wurden Unterschiede in der Beschaffenheit zwischen den Holzarten und Aufschlusstemperaturen sichtbar. Der Vergleich der labortechnischen Faserstoffe mit industriellen TMP-Stoffen, Holzschliff und Zellstoffen zeigte darüber hinaus typische Eigenschaften, wie beispielsweise die immanente Latenz der Holzfaserdämmstoff-Faserstoffe, auf.

Bezüglich des abschließenden Teilaspekts der **Wärmeleitfähigkeit** ist als Ergebnis festzuhalten, dass die Gestaltung der Mahlscheiben, die Aufschlusstemperatur und die Holzarten einen Einfluss haben. Generell führt eine hohe Aufschlusstemperatur zu niedrigeren Werten bei der Wärmeleitfähigkeit. Zu dieser Beobachtung ist allerdings zu ergänzen, dass auch mit niedrigen Aufschlusstemperaturen vergleichbare Werte mit den industriell hergestellten Faserstoffen erzielt werden können. Darüber hinaus wurden mit den labortechnisch hergestellten Fichten- und Buchenholz-Faserstoffen deutlich niedrigere Werte für die Wärmeleitfähigkeit unter vergleichbaren Bedingungen gemessen. Zudem konnte gezeigt werden, dass niedrige Werte der Wärmeleitfähigkeit **mit einer vergleichsweise niedrigen spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme erzeugt** werden können. Auch die ersten Untersuchungen zum RMP-Verfahren sind mit der Holzart Fichte vielversprechend. Hier konnte ebenfalls ein vergleichbarer Wert für die Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Für weitere Untersuchungen zu funktionalen Zusammenhängen zwischen der Beschaffenheit der Faserstoffe und der Wärmeleitfähigkeit sei abschließend auf die Methode der Mikro-Computertomographie hingewiesen, mit der die Poren des dreidimensionalen Netzwerks der Partikel innerhalb des Faservlieses untersucht werden kann.

8.2 Nutzen von Laborversuchen und Übertragung der Ergebnisse in den industriellen Maßstab

Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit zeigen, dass Versuche zur Faserstoffherzeugung im Labormaßstab durchaus zielführend sein können. In der Entwicklung von Mahlscheiben sind nach wie vor Tests notwendig, da eine Simulation der Zielgrößen bisher nicht umsetzbar ist. Im industriellen Maßstab können Mahlscheibentests hohe Kosten verursachen. Laborversuche sind ein Mittel, um Versuchskosten gering zu halten und bieten außerdem die Möglichkeit, empirische Daten zum Theorieabgleich zu generieren. Die definierte Rohstoffauswahl und die in einem weiten Bereich variierbare Prozessführung erlauben es, den Einfluss der Mahlscheibenmuster und der Prozessführung auf die Beschaffenheit der Faserstoffe gezielt zu untersuchen und Energiesparpotenziale zu identifizieren. Als nachteilig ist die kurze Laufzeit der Versuche im Labormaßstab zu sehen, die nicht den Verschleiß der Mahlscheiben im industriellen Einsatz widerspiegeln. Trotzdem erleichtert der **Erkenntnisgewinn** die Entscheidungsfindung für die industrielle Anwendung und bietet der Wissenschaft neue Einblicke in ein bislang wenig beachtetes Themenfeld der holzbasierten Biökonomie.

Mit den vorliegenden Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwicklung von Mahlscheiben zur Erzeugung spezifischer Fasergeometrien für Faserverbundwerkstoffe mit geringer Dichte“ (BMEL, FKZ: 22012216) Mahlscheibenmuster entwickelt und im industriellen Maßstab getestet. In die Tests waren nationale und internationale Holzfaserdämmstoffhersteller eingebunden. Im Rahmen der Tests wurden weitere Anpassungen an den Mahlscheibenmustern in Abhängigkeit der individuellen Anforderungen vorgenommen. Die speziell für Holzfaserdämmstoffe entwickelten Mahlscheibenmuster sind im industriellen Einsatz. Auf eine Auswertung der

industriellen Mahlscheibentests im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde verzichtet, da die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Anlagen, Rohstoffen und der Prozessführung nicht gegeben ist.

Literatur

- Abe, H. & R. Funada (2005). „Review - The Orientation of Cellulose Microfibrils in the Cell Walls of Tracheids in Conifers: A model based on observations by field emission-scanning electron microscopy“. In: *IAWA Journal* 26.2, S. 161–174.
- Aghakhani, M., A. Khazaeian, A. Rafighi & F. Scholz (2020). „Evaluation of some effective parameters on energy consumption in drum chipper“. In: *Journal of Wood and Forest Science and Technology* 26.4, S. 1–15.
- Ahrel, I. & I. Bäck (1970). „Thermomechanical pulp at Rockhammar“. In: *EUCEPA, Proceedings of Symposium of Mechanical Pulp 83. Oslo, Norway*, S. 83–91.
- Aicher, S. & Z. Christian (o. D.). „Ermüdungsverhalten von Holz und geklebten Holzbauteilen“. In: *Internationales Holzbau-Forum 2015, Forum Holzbau*, S. 1–18.
- Akhtar, M., R. A. Blanchette & T. A. Burnes (1995). „Using Simons Stain to Predict Energy Savings During Biomechanical Pulping“. In: *Wood and Fiber Science* 27.5, S. 258–264.
- Alahautala, T., E. Lassila, R. Hernberg, E. Härkönen & P. Vuorio (2004). „Optical measurement of pulp quantity in a rotating disc refiner“. In: *Measurement Science and Technology* 15.11, S. 2256–2262.
- Albrecht, W. (2010). „Neue Wärmeleitfähigkeitsstufen und Leistungsfähigkeit neuer Dämmstoffe“. In: *Bauphysik* 32.2, S. 110–117.
- Andritz AG (2015). *Montage-, Betriebs- und Wartungsanleitung Laboranlage 12-1CP FH Rosenheim*.
- Annergren, G. & N. Hagen (2016). „Industrial Beating/Refining“. In: *Paper Chemistry and Technology*. Hrsg. von M. Ek, G. Gellerstedt & G. Henriksson. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin: De Gruyter, S. 121–135.
- Anonym (1974). „Refiner Mechanical Pulping: Production of Mathematical Model“. In: *What's New in Forest Research* 20.
- Antensteiner, P. (2002). „Up-date of Current Low Consistency Refining Theories“. Dissertation. Graz: University of Graz.
- Antrag auf Nichtnennung (1998). „Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung biologisch abbaubarer Dämmplatten“. Patent. Veröffentlichungs-Nr.: DE 000019635410 A1.
- Arbeitsgruppe Sägenebenprodukte (AG SNP) im Ausschuß Forst und Holz (2000). *Richtlinie: Qualitätsanforderungen der Zellstoff- und Papierindustrie in Deutschland an die Struktur von Hackschnitzeln zur Erzeugung von Zellstoff (Sulfit-/Sulfatzellstoff) und thermomechanischem Holzstoff (TMP)*. Hrsg. von Verband Deutscher Papierfabriken e.V. Bonn.
- Asplund, A. (1940a). „Die Defibrator-Methode und ihre Anwendungsgebiete: 1. Teil“. In: *Wochenblatt für Papierfabrikation* 45, S. 590–595.
- (1940b). „Die Defibrator-Methode und Ihre Anwendungsgebiete: 2. Teil: Schluß zu Nr. 45, S. 590“. In: *Wochenblatt für Papierfabrikation* 46, S. 607–611.
- (1949). „Wallboardindustriens bakvattenfraga“. In: *Svensk Papperstidning* 52.3, S. 79–86.
- Atack, D. (1972). „On the characterization of pressurized refiner mechanical pulps“. In: *Svensk Papperstidning* 75.3, S. 89–94.
- (1976). „Mechanical pulp - conserver of our forests“. In: *Appita* 30.2, S. 155–160.

- Atack, D. & I. T. Pye (1964). „The Measurement of Grinding Zone Temperature“. In: *Pulp & Paper Magazine of Canada*, T363–376.
- Atack, D. & M. I. Stationwalla (1975). „On the measurement of temperature and pressure in the refining zone of an open discharge refiner“. In: *Transactions of the Technical Section, 1975 International Mechanical Pulping Conference*. Hrsg. von Canadian Pulp and Paper Association. Bd. 1, S. 71–76.
- Atack, D., M. I. Stationwalla, E. Huusari, P. Ahlqvist, J. Fontebasso & M. Perkola (1989). „High-Speed photography of pulp flow patterns in a 5 MW pressurized refiner“. In: *Paperi ja puu* 69, S. 280–293.
- Atack, D., M. I. Stationwalla & A. Karnis (1984). „What happens in refining“. In: *Pulp & Paper Canada* 85.12, S. 119–124.
- Atack, D. & P. N. Wood (1973). „On the high consistency operation of large double rotating disc refiners“. In: *Svensk Papperstidning* 76.17, S. 639–644.
- Ayrlimis, N., J. T. Benthien & M. Ohlmeyer (2017). „Effect of wood species, digester conditions, and defibrator disc distance on wettability of fiberboard“. In: *Journal of Wood Science* 63.3, S. 248–252.
- Back, E. L. & S. A. Larsson (1972). „Increased pulp yield as means of reducing the BOD of hardboard mill effluent“. In: *Svensk Papperstidning* 75.18, S. 723–731.
- Back, E. L. & L. Salmén (1982). „Glass transitions of wood components hold implications for molding and pulping processes“. In: *Tappi Journal* 65.7, S. 107–110.
- Barth, S. (2017). „Fasergeometrien für Faserverbundwerkstoffe mit geringer Dichte“. In: *Vortrag im 12. Holzwerkstoffkolloquium, Institut für Holztechnologie, Dresden*.
- (2018). „Möglichkeiten zur Optimierung der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen“. In: *Vortrag im 3. Kooperationsforum Holz als neuer Werkstoff, Bayern Innovativ, Regensburg*.
- (2019). „Bindemiteinsatz und Mahlplattenentwicklung in der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen“. In: *Vortrag im 13. Holzwerkstoffkolloquium, Institut für Holztechnologie, Dresden*.
- Barth, S., J. Vega, C. Fuentealba & A. Michanickl (2018). „Fiber Insulation Materials from Eucalyptus Bark Fibers - First Results“. In: *Pro Ligno* 14.4, S. 3–8.
- Bartholme, M., G. Avramidis, W. Viöl & A. Kharazipour (2009). „Herstellung von organisch gebundenen Holzfaser-Dämmplatten aus Buchenholz“. In: *Holztechnologie* 50.1, S. 23–26.
- Batel, W. (1957). „Kritische Betrachtungen zur Teilchengrößenbestimmung durch Siebanalyse, Windsichten, Sedimentieren und den Blain-Test“. In: *Chemie - Ingenieur - Technik* 29.9, S. 581.589.
- Baur, E., S. Brinkmann, T. A. Osswald, N. Rudolph & E. Schmachtenberg, Hrsg. (2013). *Sächtling Kunststoff Taschenbuch*. München: Carl Hanser Verlag.
- Becker, H., H. Höglund & G. Tistad (1977). „Frequency and temperature in chip refining“. In: *Paperi ja puu* 3, S. 123–130.
- Becker, H. & D. Noack (1968). „Studies on dynamic torsional viscoelasticity of wood“. In: *Wood Science and Technology* 2.3, S. 213–230.
- Behler, H., N. Parameswaran & R. Patt (1981). „Zur Qualität von Nadelrestholzhackschnitzeln für die Faserstoffherstellung. Mitt. I. Einfluß der Holzbeschaffenheit“. In: *Wochenblatt für Papierfabrikation* 109.
- Belgacem, N. & A. Pizzi, Hrsg. (2016). *Lignocellulosic fibers and wood handbook: Renewable materials for today's environment*. Salem, Massachusetts: Scrivener Publishing & Wiley.
- Benthien, J. T., C. Bähnisch, S. Heldner & M. Ohlmeyer (2014). „Effect of fiber size distribution on medium-density fiberboard properties caused by varied steaming time and temperature of defibration process“. In: *Wood and Fiber Science* 46.2, S. 175–185.

- Benthien, J. T., S. Heldner & M. Ohlmeyer (2017). „Investigation of the interrelations between defibration conditions, fiber size and medium-density fiberboard (MDF) properties“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 75.2, S. 215–232.
- Björklund, J. M. & N.-O. Nilvebrant (2009). „Wood Extractives“. In: *Wood Chemistry and Technology*. Hrsg. von M. Ek, G. Gellerstedt & G. Henriksson. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin: De Gruyter, S. 148–170.
- Blanchette, R. A., M. Akhtar & M. C. Attridge (1992). „Using Simons stain to evaluate fiber characteristics of biomechanical pulps“. In: *Tappi Journal* 75.11, S. 121–124.
- Blechs Schmidt, J. (2013). „Rohstoffe der Papiererzeugung“. In: *Taschenbuch der Papiertechnik*. Hrsg. von J. Blechs Schmidt. München: Carl Hanser Verlag, S. 52–60.
- Blechs Schmidt, J., P. Engert & M. Stephan (1986). „The glass transition of wood from the viewpoint of mechanical pulping“. In: *Wood Science and Technology* 20, S. 263–272.
- Bodig, J. & B. A. Jayne (1993). *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar: Krieger Publishing.
- Böhner, G. (1996). „Überlegungen und Ergänzungen zum „Keylwerth-Diagramm““. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 54, S. 73–79.
- Bohnet, M., Hrsg. (2004). *Mechanische Verfahrenstechnik*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Bonsen, K. J. M. (1991). „Gefäßverschluss-Mechanismen in Laubbäumen“. In: *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich* 136.1, S. 13–50.
- Börste, G. (2008). „New ways of energy savings in the wet fiber preparation process“. In: *Vortrag in 6. Europäisches Holzwerkstoff-Symposium, Hannover*.
- Box, G. E. P., J. S. Hunter & W. G. Hunter (2005). *Statistics for Experimenters*. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Brännvall, E. (2009). „Pulping Technology“. In: *Pulping Chemistry and Technology*. Hrsg. von M. Ek, G. Gellerstedt & G. Henriksson. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin: De Gruyter, S. 121–147.
- Braun, P. (2014). „Untersuchungen zum Energieverbrauch in der Herstellung von Holzfaserdämmplatten“. Bachelorthesis. Rosenheim: Technische Hochschule Rosenheim.
- Brombacher, V. (2015). „Untersuchungen zur Optimierung von Holzfaserdämmstoffen in Abhängigkeit von Rohstoff, Herstellverfahren und Aufschlussbedingungen“. Dissertation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule.
- Brombacher, V., M. Franco, D. Krug, M. Torres & P. Niemz (2016). „Untersuchungen zur Optimierung von Holzfaserdämmstoffen in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen“. In: *Bauphysik* 38.5, S. 298–308.
- Brombacher, V., F. Michel, P. Niemz & T. Volkmer (2012). „Untersuchungen zu Wärmeleitfähigkeit und Feuchteverhalten von Holzfaserplatten und Materialkombinationen“. In: *Bauphysik* 34.4, S. 157–169.
- BRUKS Klöckner GmbH (2015). *Betriebsanleitung Trommelhacker DH 120x400 L-2WV*.
– (2.10.2015). *Auslegung von Trommelhackmaschinen*. E-mail vom 02.10.2015.
- Carpenter, C. H. (1989). *The history of mechanical pulping*. Montgomery, Alabama, USA: Walker Printing Company,
- Chen, M., B. Coasne, R. Guyer, D. Derome & J. Carmeliet (2018). „Role of hydrogen bonding in hysteresis observed in sorption-induced swelling of soft nanoporous polymers“. In: *Nature communications* 9.1, S. 3507.
- Chen, M., B. Coasne, R. Guyer, D. Derome & J. Carmeliet (2020). „A Poromechanical Model for Sorption Hysteresis in Nanoporous Polymers“. In: *The Journal of Physical Chemistry B* 124.39, S. 8690–8703.

- Coppers, M. (2002). „Einsatz der Luft- und Flüssigkeitsstrahl-Präzisionssiebe in Labor und Technik“. In: *Aufbereitungstechnik* 43.9, S. 40–47.
- Dana, H. R., W. D. May, K. B. Miles & B. G. Newman (1975). „A study of steam flow and self-pressurization in chip refiners“. In: *Technical Papers of the International Mechanical Pulping Conference*.
- Daniel, C. (1959). „Use of Half-Normal Plots in Interpreting Factorial Two-Level Experiments“. In: *Technometrics* 1.4, S. 311–341.
- Deppe, H.-J. & K. Ernst (1996). *MDF - Mitteldichte Faserplatten*. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft, Hrsg. (2019). *MAK- und BAT-Werte-Liste 2019: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte : Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe*. Bonn.
- Deutscher Bundestag (2020). *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*.
- DIN 66165-1:2016-08 (2016). *Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Teil 1: Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 6721-1:2019 (2019). *Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN ISO 9276-1:2004-09 (2004). *Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 1: Grafische Darstellung*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN ISO 9276-2:2018-09 (2018). *Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 2: Berechnung von mittleren Partikelgrößen / -durchmessern und Momenten aus Partikelgrößenverteilungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN ISO 9276-6:2012-01 (2012). *Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 6: Deskriptive und quantitative Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN V 4108-4:2004-07 (2004). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchtetechnische Bemessungswerte*. Berlin: Beuth Verlag.
- Ding, F., M. Benaoudia, P. Bédard, R. Lanquette, C. Lejeune & P. Gagné (2005). „Wood chip physical quality definition and measurement“. In: *Pulp & Paper Canada* 106.2, T25–T30.
- Du, N., J. Fan, H. Wu & W. Sun (2009). „Optimal porosity distribution of fibrous insulation“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.19-20, S. 4350–4357.
- Eberhardt, L. (1955). „New and revolutionary Method for production of mechanical pulp: Groundwood from wood chips“. In: *Paper Trade Journal* 37, S. 26–28.
- (1960). „Method of Producing Wood Pulp“. Patent. Veröffentlichungs-Nr.: 2,947,655.
- Eichhorn, S. (2017). „Entwicklung neuartiger mit Polyurethan gebundener Holzfaserdämmstoffe mit geringer Rohdichte“. Dissertation. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen.
- Ek, M., G. Gellerstedt & G. Henriksson, Hrsg. (2009). *Pulping Chemistry and Technology*. 1. Aufl. Bd. 2. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin: De Gruyter.
- EN ISO 10456:2007 + AC:2009 (2010). *Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*. Berlin: Beuth Verlag.
- EN ISO 4610:2001 (2002). *Kunststoffe - Vinylchlorid-Homo- und Copolymerisate. Siebanalyse mit der Luftstrahl-Siebmaschine*. Berlin.
- Engelhardt, F. (1979). „Untersuchungen über die Wasserdampfsorption durch Buchenholz im Temperaturbereich von 110 bis 170°C“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 37.3, S. 99–112.

- Engelund, E. T., L. Thygesen, S. Svensson & C. A. S. Hill (2013). „A critical discussion of the physics of wood–water interactions“. In: *Wood Science and Technology* 47.1, S. 141–161.
- Eriksen, O., Ø. Gregersen & P.-A. Krogstad (2006). „Pressure and vibration in the refining zone of a TMP refiner – influence of the fibre flow“. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 21.1, S. 90–98.
- Eriksson, K. & A. Karlstroem (2009). „Modeling approaches for critical process limitations in the operation of thermomechanical pulp refiners“. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 24.2, S. 231–238.
- Esteghlalian, A. R., M. Bilodeau, S. D. Mansfield & J. N. Saddler (2001). „Do enzymatic hydrolyzability and Simons' stain reflect the changes in the accessibility of lignocellulosic substrates to cellulase enzymes?“ In: *Biotechnology progress* 17.6, S. 1049–1054.
- EU (2011). *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates: EU-Bauproduktenverordnung (BauPVO)*.
- Euwid (5.07.2018). „Europäische Holzwerkstoffproduktion ist im vergangenen Jahr um 3,0 % gestiegen: Überproportionale Zuwächse bei Sperrholz, OSB und Dämmplatten“. In: *EUWID Holz- und Holzwerkstoffe* 92.27, S. 1, 11.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Hrsg. (2020). *Basisdaten Biobasierte Produkte 2021*.
- Faix, O. (2008). „Chemie des Holzes“. In: *Taschenbuch der Holztechnik*. Hrsg. von A. Wagenführ & F. Scholz. München: Carl Hanser Verlag, S. 47–74.
- Fengel, D. (1966). „Über die Veränderung des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200°C - Erste Mitteilung: Heiß- und Kaltwasserextrakte von thermisch behandeltem Fichtenholz“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 24.1, S. 9–14.
- Fengel, D. & M. Stoll (1973). „Über die Veränderungen des Zellquerschnitts, der Dicke der Zellwand und der Wandschichten von Fichtenholz-Tracheiden innerhalb eines Jahrringes“. In: *Holzforschung* 27.1, S. 1–7.
- Fengel, D. & G. Wegener (2003). *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions*. Reprint der Orig.-Ausg. (ehem. de Gruyter). Remagen: Verlag Kessel.
- Ferguson, K. H. (1997). „TMP Technologies Focus on Reducing Energy Use“. In: *Pulp & Paper* 71.6, S. 99–102.
- Fernando, D. & G. Daniel (2004). „Micro-morphological observations on spruce TMP fibre fractions with emphasis on fibre cell wall fibrillation and splitting“. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 19.3, S. 278–285.
- (2008). „Exploring Scots pine fibre development mechanisms during TMP processing: Impact of cell wall ultrastructure (morphological and topochemical) on negative behaviour“. In: *Holzforschung* 62.5, S. 597–607.
- (2010). „Characterization of spruce thermomechanical pulps at the fiber cell wall level: a method for quantitatively assessing pulp fiber development using Simons stain“. In: *Tappi Journal* 9, S. 47–55.
- Fischer, K. & C. Bäurich (2013). „Chemischer Aufschluss von Holz“. In: *Taschenbuch der Papier-technik*. Hrsg. von J. Blechschmidt. München: Carl Hanser Verlag, S. 109–165.
- Forest Products Laboratory (2010). *Wood Handbook - Wood as an engineering material: General Technical Report FPL-GTR-190*. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Forgacs, O. L. (1963). „The characterization of mechanical pulps“. In: *Pulp & Paper Magazine of Canada* Convention Issue, T86–T116.

- Fox, T. S., R. S. Brodkey & A. H. Nissan (1979). „High-speed photography of stock transport in a disk refiner“. In: *Tappi Journal* 62.3, S. 55–58.
- Franzén, R. (1986). „General and selective upgrading of mechanical pulps“. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 3/1986, S. 4–13.
- Fredrikson, A. & J. Paltakari (2020). „Maximizing pulp output and quality through measurement of plate gap temperature in high-consistency refining“. In: *BioResources* 15.2, S. 2258–2278.
- Fredriksson, M. & E. E. Thybring (2018). „Scanning or desorption isotherms? Characterising sorption hysteresis of wood“. In: *Cellulose* 25.8, S. 4477–4485.
- Fromm, J. (2013). „Xylem Development in Trees: From Cambial Divisions to Mature Wood Cells“. In: *Cellular Aspects of Wood Formation*. Hrsg. von J. Fromm. Plant Cell Monographs. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3–39.
- Fromm, J., B. Rockel, S. Lautner, E. Windeisen & G. Wanner (2003). „Lignin distribution in wood cell walls determined by TEM and backscattered SEM techniques“. In: *Journal of Structural Biology* 143.1, S. 77–84.
- Gao, X. (2014). „Untersuchung zur Optimierung der Mahlscheiben im MDF-Werk“. Masterthesis. Rosenheim: Technische Hochschule Rosenheim.
- Gellerstedt, G. (2009). „Mechanical Pulping Chemistry“. In: *Pulping Chemistry and Technology*. Hrsg. von M. Ek, G. Gellerstedt & G. Henriksson. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin: De Gruyter, S. 35–56.
- Geoffrey, D. (2009). „Wood and Fibre Morphology“. In: *Wood Chemistry and Technology*. Hrsg. von M. Ek, G. Gellerstedt & G. Henriksson. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin: De Gruyter, S. 46–70.
- Gerthsen, C., H. Vogel & D. Meschede, Hrsg. (2006). *Gerthsen Physik*. 23. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Gorski, D., J. Hill, P. Engstrand & L. Johansson (2010). „Review: Reduction of energy consumption in TMP refining through mechanical pre-treatment of wood chips“. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 25.2, S. 156–161.
- Grömping, U. (2014). „R Package FrF2 for Creating and Analyzing Fractional Factorial 2-Level Designs“. In: *Journal of Statistical Software* 56.1.
- (2015). „Augmented Half Normal Effects Plots in the Presence of a Few Error Degrees of Freedom“. In: *Quality and Reliability Engineering International* 31.7, S. 1185–1196.
- Grömping, U. & J. Fox (2015). *R Commander Plugin for (industrial) Design of Experiments*. <http://prof.beuth-hochschule.de/groemping/DoE>, 2014-08-28 19:56:17.
- Guo, X., J. Dong, H. Liu, C. Duan, R. Yang & K. Qi (2020). „Effect of Combined Refining Plates with Different Bar Angles on Paper Properties during Mixed Pulp Refining“. In: *Journal of Korean Wood Science and Technology* 48.5, S. 581–590.
- Hänninen, T., E. Kontturi & T. Vuorinen (2011). „Distribution of lignin and its coniferyl alcohol and coniferyl aldehyde groups in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* as observed by Raman imaging“. In: *Phytochemistry* 72.14–15, S. 1889–1895.
- Hartler, N. (1963). *Some Studies on the Quality of Wood Chips for Pulp Production*. Stockholm.
- (1977). „Influence of Chip Moisture in Mechanical Pulping“. In: *Proceedings Volume 1 Session 1 "Raw Materials and their Handling"*. Hrsg. von The Finnish Paper Engineers' Association & The Finnish Pulp and Paper Research Institute, 6:1–6:19.
- Hasener, J. (2013). „Inline Fasercharakterisierung, kein Traum sondern Realität - erste Praxiserfahrungen.“ In: *3. GreCon-Holzwerkstoffsymposium, Magdeburg*.
- Havimo, M. (2009). „A literature-based study on the loss tangent of wood in connection with mechanical pulping“. In: *Wood Science and Technology* 43.7–8, S. 627–642.

- Heikkurinen, A. & L. Leskelä (1999). „The character and properties of mechanical pulps“. In: *Mechanical pulping*. Hrsg. von J. Sundholm. Papermaking Science and Technology. Helsinki: Fapet Oy, S. 395–413.
- Heinemann, S. (2013). „Aufbereitung des Holzstoffes - Sortierung und Rejektbehandlung“. In: *Taschenbuch der Papiertechnik*. Hrsg. von J. Blechschmidt. München: Carl Hanser Verlag, S. 96–98.
- Heinrich, H. (2004). *Abschlussbericht zur Prüfung der Dämmeigenschaften von TMP-Faserstoffen unterschiedlicher Holzarten*. Technische Universität Kaiserslautern.
- Henriksson, G. (2009). „Lignin“. In: *Wood Chemistry and Technology*. Hrsg. von M. Ek, G. Gellerstedt & G. Henriksson. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin: De Gruyter, S. 121–145.
- Henriksson, G. & H. Lennholm (2009). „Cellulose and Carbohydrate Chemistry“. In: *Wood Chemistry and Technology*. Hrsg. von M. Ek, G. Gellerstedt & G. Henriksson. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin: De Gruyter, S. 72–99.
- Herberich, E., J. Sikorski & T. Hothorn (2010). „A robust procedure for comparing multiple means under heteroscedasticity in unbalanced designs“. In: *PloS one* 5.3, e9788.
- Hill, C. A. S., B. A. Keating, Z. Jalaludin & E. Mahrdrdt (2012). „A rheological description of the water vapour sorption kinetics behaviour of wood invoking a model using a canonical assembly of Kelvin-Voigt elements and a possible link with sorption hysteresis“. In: *Holzforschung* 66.1.
- Hillis, W. E. (1971). „Distribution, properties and formation of some wood extractives“. In: *Wood Science and Technology* 5.4, S. 272–289.
- Hillis, W. E. & A. N. Rosza (1978). „The Softening Temperatures of Wood“. In: *Holzforschung* 32.2, S. 68–73.
- Hobballah, M. H., A. Ndiaye, F. Michaud & M. Irle (2018). „Formulating preliminary design optimization problems using expert knowledge: Application to wood-based insulating materials“. In: *Expert Systems with Applications* 92, S. 95–105.
- Hoffmeyer, P., E. T. Englund & L. Thygesen (2011). „Equilibrium moisture content (EMC) in Norway spruce during the first and second desorptions“. In: *Holzforschung* 65.6, S. 875–882.
- Höglund, H., U. Sohlén & G. Tistad (1976). „Physical properties of wood in relation to chip refining“. In: *Tappi Journal* 59.6, S. 144–147.
- Holzer, W. F., J. T. Henderson, W. B. West & K. F. Byington (1962). „The development and production of disk-refined groundwood pulp“. In: *Tappi Journal* 45.3, S. 208–213.
- Htun, M., P. Engstrand & L. Salmén (1988). „The implication of lignin softening on latency removal of mechanical and chemimechanical pulps“. In: *Journal of Pulp and Paper Science* 14.5, J109–J113.
- Htun, M., L. Salmén & L. Eriksson (1993). „A better understanding of wood as a material - a way to increased energy efficiency when making Mechanical Pulps?“ In: *Energy Efficiency in Progress Technology*. Hrsg. von P. A. Pilavachi. London & New York: Elsevier & Elsevier Applied Science, S. 1086–1095.
- Huber, B. & G. Prütz (1938). „Über den Anteil von Fasern, Gefäßen und Parenchym am Aufbau verschiedener Hölzer“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 10.1, S. 377–381.
- Illikainen, M., E. Härkönen & J. Niinimäki (2010). „Studies on the mechanisms of TMP refining - Volume fraction of pulp in the inner refining zone“. In: *Paperi ja puu* 92.3, S. 28–31.
- Illikainen, M., E. Härkönen, M. Ullmar & J. Niinimäki (2008). „Disruptive shear stress in spruce and pine TMP pulps“. In: *Paperi ja puu* 90.1, S. 47–52.
- Imken, A. A. P., B. Plinke & C. Mai (2021). „Characterisation of hardwood fibres used for wood fibre insulation boards (WFIB)“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 79, S. 915–924.
- Irvine, G. M. (1985). „The significance of the glass transition of lignin in thermomechanical pulping“. In: *Wood Science and Technology* 19, S. 139–149.

- Ishikawa, A., N. Kuroda & A. Kato (2004). „In situ measurement of wood moisture content in high-temperature steam“. In: *Journal of Wood Science* 50.1, S. 7–14.
- ISO 8302:1991 (1991). *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus*. Berlin: Beuth Verlag.
- Jayme, G. & D. Fengel (1961). „Beitrag zur Kenntnis des Feinbaus der Frühholztracheiden“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 19.2, S. 50–55.
- Jensen, U. (1975). „Technisches Anleitungsblatt für die Holzindustrie 1975/2: Charakterisierung der Feinheit von Holzfaserstoff durch trockene Siebfraktionierung“. In: *Holztechnologie* 16.3, S. 182–184.
- Jumag Dampferzeuger GmbH (2014). *Betriebsanleitung Baureihe DG 160 - DG 560*.
- Kaemmerlen, A., F. Asllanej, H. Sallée, D. Baillis & G. Jeandel (2010). „Transient modeling of combined conduction and radiation in wood fibre insulation and comparison with experimental data“. In: *International Journal of Thermal Sciences* 49.11, S. 2169–2176.
- Karnis, A. (1994). „The mechanism of fibre development in mechanical pulping“. In: *Journal of Pulp and Paper Science* 20.10, J280–J288.
- Kauman, W. G. (1956). „Equilibrium moisture content relations and drying control in superheated steam drying“. In: *Forest Products Journal* 6, S. 328–332.
- Kawasaki, T., M. Zhang & S. Kawai (1998). „Manufacture and properties of ultra-low-density fiberboard“. In: *Journal of Wood Science* 44.5, S. 354–360.
- Keays, J. L. & R. A. Leask (1973). „Refiner Mechanical Pulp - Past Present and Potential“. In: *Paper Trade Journal* 35, S. 20–23.
- Kelley, S. S., T. G. Rials & W. G. Glasser (1987). „Relaxation behaviour of the amorphous components of wood“. In: *Journal of Materials Science* 22.2, S. 617–624.
- Kerekes, R. J. (2010). „Energy and Forces in Refining“. In: *Journal of Pulp and Paper Science* 36.1-2.
- (2015). „Perspectives on high and low consistency refining in mechanical pulping“. In: *BioResources* 10.4, S. 8795–8811.
- Knauf, M. & A. Frühwald (2020). *Broschüre Laubholz-Produktmärkte aus technisch-wirtschaftlicher und marktstruktureller Sicht*. Hrsg. von Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Koch, G. & U. Schmitt (2013). „Topochemical and Electron Microscopic Analyses on the Lignification of Individual Cell Wall Layers During Wood Formation and Secondary Changes“. In: *Cellular Aspects of Wood Formation*. Hrsg. von J. Fromm. Plant Cell Monographs. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 41–69.
- Kojiro, K., T. Miki, H. Sugimoto, M. Nakajima & K. Kanayama (2010). „Micropores and mesopores in the cell wall of dry wood“. In: *Journal of Wood Science* 56.2, S. 107–111.
- Kollmann, F. (1951a). „Anatomie und Pathologie des Holzes“. In: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Hrsg. von F. Kollmann. Springer, S. 1–109.
- (1951b). „Physik des Holzes“. In: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Hrsg. von F. Kollmann. Springer, S. 327–574.
- (1965). „Die Bedeutung der Gaußschen Normalverteilung für Struktur, Sorption und Rheologie von Holz“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 23.5, S. 165–173.
- (1987). „Poren und Porigkeit in Hölzern“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 45.1, S. 1–9.
- Kollmann, F. & L. Malmquist (1956). „Über die Wärmeleitzahl von Holz und Holzwerkstoffen“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 14.6, S. 201–204.
- Koran, Z. (1970). „Surface structure of thermomechanical pulp fibers studied by electron microscopy“. In: *Wood and Fiber Science* 2.3, S. 247–258.
- (1981). „Energy Consumption in Mechanical Fibre Separation as a Function of Temperature“. In: *Pulp & Paper Canada* 82.6, TR40–TR44.

- Košík, M., M. Dandárová & R. Domanský (1968). „Pyrolyse des Buchenholzes bei niedrigen Temperaturen IX.: Chemische Veränderungen im Buchenholz während der Pyrolyse“. In: *Holzforschung Holzverwendung* 21, S. 40–43.
- Krpan, J. von (1954). „Untersuchungen über den Fasersättigungspunkt des Buchen-, Eichen-, Tannen- und Fichtenholzes“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 12.3, S. 84–91.
- Krug, D. (2010). „Einfluss der Faserstoff-Aufschlussbedingungen und des Bindemittels auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF) für eine Verwendung im Feucht- und Außenbereich“. Dissertation. Universität Hamburg.
- Kucera, B. (1994). „A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in norway spruce“. In: *Wood and Fiber Science* 26.1, S. 152–167.
- Kulasinski, K., R. Guyer, D. Derome & J. Carmeliet (2015). „Water Adsorption in Wood Microfibril-Hemicellulose System: Role of the Crystalline-Amorphous Interface“. In: *Biomacromolecules* 16.9, S. 2972–2978.
- Kürschner, K. (1966). *Chemie des Holzes*. 2. Auflage. Berlin: Technischer Verlag Herbert Cram.
- Kwok, T. T., D. N. Fogg, M. J. Realff & A. S. Bommarius (2017). „Applying Direct Yellow 11 to a modified Simons' staining assay“. In: *Cellulose* 24.6, S. 2367–2373.
- Ladenburger, C. (2010). „Untersuchungen zur Optimierung der Faserherstellung einer MDF-Produktionslinie“. Diplomarbeit. Hochschule Rosenheim.
- Lamb, G. E. R. (1960). „The Efficiency of Mechanical Pulping Processes“. In: *Tappi Journal* 43.11, S. 989–944.
- Lampert, H. (1967). *Faserplatten: Rohstoffe, Herstellungsverfahren, Eigenschaften*. 3. Auflage. Leipzig: Fachbuchverlag.
- Lashkov, V. A., E. I. Levashko & R. G. Safin (2001). „Heating of Production Wood Chips in a Saturated-Steam Medium“. In: *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 74.1, S. 112–118.
- Leask, R. A. (1968). „Developments in refiner groundwood“. In: *Paper Technology* 9.6, S. 489–497.
- (1973). „The status of refiner mechanical pulping“. In: *Svensk Papperstidning* 17, S. 631–638.
- (1987). „Refiner Plates“. In: *Pulp and paper manufacture*. Hrsg. von O. V. Ingruber, M. J. Kocurek & F. Stevens. Atlanta: Joint Textbook Committee of the Paper Industry, S. 93–97.
- Lee, M., S.-M. Lee, E.-C. Kang & D.-W. Son (2019). „Combustibility and Characteristics of Wood-Fiber Insulation Boards Prepared with Four Different Adhesives“. In: *BioResources* 14.3, S. 6316–6330.
- Lein, F. (1978). „Tendenzen der MDF-Plattenerzeugung“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 26.10, S. 379–382.
- Leißner, T. (2015). „Beitrag zur Kennzeichnung von Aufschluss- und Trennerfolg am Beispiel der Magnetscheidung“. Dissertation. Freiberg: Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- Lenth, C. A. & F. A. Kamke (2001). „Equilibrium moisture content of wood in high-temperature pressurized environments“. In: *Wood and Fiber Science* 33.1, S. 104–118.
- Leschonski, K. (1984). „Representation and Evaluation of Particle Size Analysis Data“. In: *Particle & Particle Systems Characterization* 1.1-4, S. 89–95.
- Liimatainen, H., P. Haikkala, M. Lucander, R. Karojärvi & O. Tuovinen (1999). „Grinding and Pressure Grinding“. In: *Mechanical pulping*. Hrsg. von J. Sundholm. Papermaking Science and Technology. Helsinki: Fapet Oy, S. 107–158.
- Lim, T.-S. & W.-Y. Loh (1996). „A comparison of tests of equality of variances“. In: *Computational Statistics & Data Analysis* 22, S. 287–301.
- Lindholm, C.-A. & J. A. Kurdin (1999). „Chemimechanical Pulping“. In: *Mechanical pulping*. Hrsg. von J. Sundholm. Papermaking Science and Technology. Helsinki: Fapet Oy, S. 223–248.

- Lindstrom, H. (1997). „Fiber length, tracheid diameter, and latewood percentage in norway spruce: development from pith outwards“. In: *Wood and Fiber Science* 29.1, S. 21–34.
- Lowgren, U. (1941). „Asplund Defibrating Process“. In: *Paper Trade Journal*, S. 29–32.
- Maier, G. (1983). „Spanungstechnische Grundlagen der Hackschnitzelerzeugung in Trommelhackern“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 41.10, S. 437–439.
- Makas, M. (2016). „Leichte Faserplatten und Dämmung“. In: *Tagungsband der Fachtagung Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Hrsg. von Verein zur Förderung holzbiologischer und holztechnischer Forschung e. V. Göttingen: Selbstverlag.
- Maku, T. (1954). „Studies on the Heat Conduction in Wood“. In: *Wood Research* 13, S. 1–80.
- Malkov, S., V. Kuzmin, V. Baltakhinov & P. Tikka (2002). „Efficiency of chip presteaming - result of heating and air escape processes“. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 17.4, S. 420–426.
- Manohar, K., G. S. Kochhar & D. W. Yarbrough (2012). „Heat Transfer Across Opaque Fibers“. In: *Journal of Heat Transfer* 134.7, S. 072601-1-072601–8.
- Mantau, U. (2012). *Standorte der Holzwirtschaft, Holzrohstoffmonitoring, Holzwerkstoffindustrie - Kapazitätsentwicklung und Holzrohstoffnutzung im Jahr 2010*. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forswirtschaft, Hamburg.
- Melelli, A., O. Arnould, J. Beaugrand & A. Bourmaud (2020). „The middle lamella of plant fibers used as composite reinforcement: investigation by atomic force microscopy“. In: *Molecules* 25.3, S. 632.
- Menck, D. (1994). „Das LPS 200 MC - Eine neuartige Analysensiebmaschine für den Fein- und Feinstbereich“. In: *Aufbereitungstechnik* 35.7, S. 359–366.
- Meng, X., M. Foston, J. Leisen, J. DeMartini, C. E. Wyman & A. J. Ragauskas (2013). „Determination of porosity of lignocellulosic biomass before and after pretreatment by using Simons' stain and NMR techniques“. In: *Bioresource technology* 144, S. 467–476.
- Merakeb, S., F. Dubois & C. Petit (2009). „Modeling of the sorption hysteresis for wood“. In: *Wood Science and Technology* 43.7-8, S. 575–589.
- Michel, F., V. Brombacher & P. Niemz (2014). „Optimization of fiber board properties“. In: *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW Forestry and Wood Technology* 86, S. 180–188.
- Michel, T. (2017). *MDF Refiner Plates Design Theory*. Andritz AG.
- Miles, K. & W. D. May (1990). „The Flow of Pulp in Chip Refiners“. In: *Journal of Pulp and Paper Science* 16.2, J63–J72.
- Mott, L., L. H. Groom & S. Shaler (2002). „Mechanical Properties of Individual Southern Pine Fibers. Part 11. Comparison of Earlywood and Latewood Fibers with Respect to Tree Height and Juvenility“. In: *Wood and Fiber Science* 34.2, S. 221–237.
- Muguet, M. d. S., J. L. Colodette & A.-S. Jääskeläinen (2012). „Alkaline Peroxide Mechanical Pulping of Novel Brazilian Eucalyptus Hybrids“. In: *BioResources* 7.3, S. 3823–3836.
- Muhic, D., J.-P. Huhtanen, L. Sundström, C. Sandberg, M. Ullmar, P. Vuorio & P. Engstrand (2011). „Energy efficiency in double disc refining - influence of intensity by segment design“. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 26.3, S. 224–230.
- Murton, K., G. Duffy & S. Corson (2002). *Pulp residence time influence on refining intensity and pulp quality*. In: 56th Appita Annual Conference, Rotorua, New Zealand 18-20 March 2002: Proceedings. Appita Inc.. S. 185.
- Neill, M. T. & L. R. Beath (1963). „Supergroundwood: its manufacture from chips and use as sole newsprint furnish“. In: *Pulp & Paper Magazine of Canada* 64, T299–T312.
- Neimsuwan, T., S. Wang & X. Philip Ye (2008). „Effects of refining steam pressure on the properties of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) fibers“. In: *Holzforschung* 62.5, S. 155.

- Niemz, P. & W. Sonderegger (2017). „Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen gegenüber Feuchte“. In: *Holzphysik*. München: Carl Hanser Verlag, S. 69–132.
- Noack, D. (1959). „Beitrag zur Sorption des Holzes im Bereich höherer Temperaturen und Wasserdampfdrücke“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 17.5, S. 205–212.
- Olsson, A.-M. & L. Salmén (1997). „The effect of lignin composition on the viscoelastic properties of wood“. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 12.3, S. 140–144.
- Ormondroyd, G. A., S. K. Källbom, S. F. Curling, B. K. Stefanowski, B. K. Segerholm, M. E. P. Wålinder & D. Jones (2017). „Water sorption, surface structure and surface energy characteristics of wood composite fibres refined at different pressures“. In: *Wood Material Science & Engineering* 12.4, S. 203–210.
- Parameswaran, N., H. J. Dengg & R. Patt (1985). „Restholz hackschnitzel für die Herstellung von TMP und Zellstoff“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 43.1, S. 1–8.
- Patera, A., H. Derluyn, D. Derome & J. Carmeliet (2016). „Influence of sorption hysteresis on moisture transport in wood“. In: *Wood Science and Technology* 50.2, S. 259–283.
- Patt, R., N. Parameswaran, J. Kruse & H. Behler (1981). „Zur Qualität von Nadelrestholz hackschnitzeln für die Faserstoffherstellung: 2. Mitt. Einfluß der Hackschnitzelherstellung auf die Struktur und Eigenschaften von Faserstoffen“. In: *Wochenblatt für Papierfabrikation* 109, S. 919–926.
- Patt, R., M. Welte & H. Burkhart (1980). „Untersuchungen über den Einfluß der Beschaffenheit von Industrierestholz auf die Eigenschaften von TMP und Zellstoffen“. In: *Papier* 34.10A, S. V1–V9.
- Pavel, C. C. & D. T. Blagoeva (2018). *Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings*. Hrsg. von European Commission Joint Research Centre.
- Pearson, A. J. (1990). *A unified theory of refining*. Bd. 6. Pulp and Paper Technology Series. Atlanta: TAPPI.
- Peterson, V. & G. Dahlquist (1975). „Refining of preheated chips. The effect of some process variables on pulp quality“. In: *International Mechanical Pulping Conference San Francisco, USA, Vol. I*, S. 11–15.
- Peterson, V., G. Dahlquist & B. Engström (1973). „Single-stage refining of preheated chips at SCA in Sweden“. In: *Pulp and Paper International* 15, S. 1973.
- Petit-Conil, M., M. Lecourt & M. Meyer (2016). „High-yield pulps: an interesting concept for producing lignocellulosic fibers“. In: *Lignocellulosic fibers and wood handbook*. Hrsg. von N. Belgacem & A. Pizzi. Salem, Massachusetts: Scrivener Publishing & Wiley, S. 157–206.
- Placet, V., J. Passard & P. Perré (2007). „Viscoelastic properties of green wood across the grain measured by harmonic tests in the range 0–95°C: Hardwood vs. softwood and normal wood vs. reaction wood“. In: *Holzforschung* 61.5, S. 548–557.
- Plinke, B., J. T. Benthien, A. Krause, K. C. Krause, A. Schirp & L. Teuber (2016). „Optische Größenvermessung von Holzpartikeln für die WPC-Herstellung: Vergleich dreier Messverfahren“. In: *Holztechnologie* 57.4, S. 43–50.
- R Core Team (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. Wien: R Foundation for Statistical Computing.
- Radmanović, K., I. Đukić & S. Pervan (2014). „Specific Heat Capacity of Wood“. In: *Drvna industrija* 65.2, S. 151–157.
- Richter, C. (1993). „Neues Verfahren zur Herstellung von Dämmstoffen niedriger Dichte aus Holz und Einjahrespflanzen“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 51.4, S. 235–239.
- Roffael, E., B. Dix, G. Bär & R. Bayer (1994a). „Über die Eignung von thermo-mechanischem und chemo-thermo-mechanischem Holzstoff (TMP und CTMP) aus Buchen- und Kiefernholz für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF): Teil 1: Aufschluss des Holzes und Eigenschaften der Faserstoffe“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 52.4, S. 239–246.

- Roffael, E., B. Dix, G. Bär & R. Bayer (1994b). „Über die Eignung von thermo-mechanischem und chemo-thermo-mechanischem Holzstoff (TMP und CTMP) aus Buchen- und Kiefernholz für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF): Teil 2: Eigenschaften von MDF aus Buchen-Faserstoff“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 52.5, S. 293–298.
- (1995). „Über die Eignung von thermo-mechanischem (TMP) und chemo-thermomechanischem (CTMP) Holzstoff aus Buchen- und Kiefernholz für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF): Teil 3: Eigenschaften von aus Kiefern-Faserstoff hergestellten MDF“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 53.1, S. 8–11.
- Roll, H. (2008). „Refiner Layout, Dimensioning, Practical Experience“. In: *6th European Wood-Based Panel Symposium*.
- (2010a). „Optimierung des Faseraufschlusses im Refiner: Energierrelevante Aspekte der Refinerscheibentechnologie bei der MDF-Herstellung unter Berücksichtigung der Faserqualität“. In: *Holz-Zentralblatt* 2010.16, S. 423–424.
 - (2010b). „Optimierung des Faseraufschlusses im Refiner: Energierrelevante Aspekte der Refinerscheibentechnologie bei der MDF-Herstellung unter Berücksichtigung der Faserqualität“. In: *Holz-Zentralblatt* 2010.17, S. 443–444.
- Rowell, R. M., R. Pettersen & M. A. Tschabalala (2013). „Cell Wall Chemistry“. In: *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Hrsg. von R. M. Rowell. Boca Raton: Taylor & Francis & CRC Press, S. 33–74.
- Rumpf, H. (1967). „Über die Eigenschaften von Nutzstäuben“. In: *Staub, Reinhaltung der Luft* 27.1, S. 3–13.
- Sabourin, M. (2003). „Effect of increasing wood chip defibration on thermomechanical refining efficiency“. In: *International Mechanical Pulping Conference, Quebec City, 2003*, S. 163–170.
- Salmén, L. (1981). „The fundamentals of energy consumption during viscoelastic and plastic deformation of wood“. In: *Presented at the 1981 International mechanical pulping conference, EUCEPA, Oslo*.
- (1984). „Viscoelastic properties of in situ lignin under water-saturated conditions“. In: *Journal of Materials Science* 19, S. 3090–3096.
 - (2004). „Micromechanical understanding of the cell-wall structure“. In: *Comptes rendus biologiques* 327.9-10, S. 873–880.
 - (2015). „Wood morphology and properties from molecular perspectives“. In: *Annals of Forest Science* 72.6, S. 679–684.
- Salmén, L. & P. A. Larsson (2018). „On the origin of sorption hysteresis in cellulosic materials“. In: *Carbohydrate Polymers* 182, S. 15–20.
- Salmén, L., M. Lucander, E. Härkönen & J. Sundholm (1999). „Fundamentals of mechanical pulping“. In: *Mechanical pulping*. Hrsg. von J. Sundholm. Papermaking Science and Technology. Helsinki: Fapet Oy, S. 35–65.
- Salmén, L., A.-M. Olsson, J. S. Stevanic, J. Simonovic & K. Radotic (2012). „Structural organisation of the wood polymers in the wood fibre structure“. In: *BioResources* 7.1, S. 521–532.
- Salmén, L. & B. Petterson (1995). „The Primary Wall; Important for Fibre Separation in Mechanical Pulping“. In: *Cellulose Chemistry and Technology* 29.3, S. 331–337.
- Sandberg, C., J. Hill & M. Jackson (2020). „On the development of the refiner mechanical pulping process – a review“. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 35.1, S. 1–17.
- Sandermann, S. & H. Augustin (1964). „Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz - Dritte Mitteilung: Chemische Untersuchung des Zersetzungsablaufs“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 22, S. 377–386.
- SCAN-CM 40 (2001). *Wood chips for pulp production. Size distribution*. Stockholm.

- Scheiding, W. (2000). „Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserstoff“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 58.3, S. 177–181.
- Schirp, A., M. Mannheim & B. Plinke (2014). „Influence of refiner fibre quality and fibre modification treatments on properties of injection-moulded beech wood-plastic composites“. In: *Composites: Part A* 61, S. 245–257.
- Schirp, A., B. Plinke & D. Napolow (2015). „Effectiveness of organic and inorganic pigments for mass colouration of thermo-mechanical pulp used in wood-plastic composites“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 73.1, S. 5–16.
- Schlüter, S. (2017). *Optimum Resolution & Sharpening Settings for Epson Scanners*.
- Schmid, H., G. Schmid, I. Schmid-Götte & C. Buda (2020). *X-Shape Manual* 6.2.2.
- Schmidt, P. (1967). „Probleme der Feinabsiebung“. In: *Aufbereitungstechnik* 6, S. 322–324.
- Schmidt, P. & M. Coppers (1998). „Erfahrungen mit dem schnellen Rhewum-Mehrflächen-Präzisions luftstrahlsieb MPS“. In: *Aufbereitungstechnik* 39.7, S. 343–347.
- Schmidt, P., R. Körber & M. Coppers (2003). *Sieben und Siebmaschinen: Grundlagen und Anwendung*. Weinheim: VCH.
- Schneider, T., E. Roffael & B. Dix (2000). „Einfluß von Holzaufschlußverfahren (TMP-, CTMP-Verfahren) und Aufschlußbedingungen auf die physikalisch-technologischen Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF)“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 58, S. 123–124.
- Schönert, K. (2003). „Zerteilprozesse“. In: *Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik*. Hrsg. von H. Schubert. Weinheim: Wiley-VCH, S. 298–382.
- Schulz, H. (1957). „Der Anteil der einzelnen Zellarten an dem Holz der Rotbuche“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 15.3, S. 113–118.
- Sekino, N. (2016). „Density dependence in the thermal conductivity of cellulose fiber mats and wood shavings mats: Investigation of the apparent thermal conductivity of coarse pores“. In: *Journal of Wood Science* 62.1, S. 20–26.
- Simon, F. L. (1950). „A stain for use in the microscopy of beaten fibers“. In: *Tappi Journal* 33.7, S. 312–314.
- Skaar, C. (1988). „Wood moisture and the Environment“. In: *Wood-water relations*. Hrsg. von T. E. Timell & C. Skaar. Springer Series in Wood Science. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–45.
- Smith, I., E. Landis & M. Gong (2003a). „Mechanical behaviour of wood“. In: *Fracture and fatigue in wood*. Hrsg. von I. Smith, E. Landis & M. Gong. Chichester: John Wiley & Sons, S. 37–65.
- (2003b). „Structure and properties of wood“. In: *Fracture and fatigue in wood*. Hrsg. von I. Smith, E. Landis & M. Gong. Chichester: John Wiley & Sons, S. 7–35.
- Solala, I., T. Antikainen, M. Reza, L.-S. Johansson, M. Hughes & T. Vuorinen (2014). „Spruce fiber properties after high-temperature thermomechanical pulping (HT-TMP)“. In: *Holzforschung* 68.2.
- Sonderegger, W., S. Hering & P. Niemz (2011). „Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions“. In: *Holzforschung* 65.3, S. 333.
- Sonderegger, W. & P. Niemz (2012). „Thermal and moisture flux in soft fibreboards“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 70.1-3, S. 25–35.
- Sorensen, J. S. (1915). „Attrition Mill“. Patent. Veröffentlichungs-Nr.: 1,146,032.
- Srebotnik, E. & K. Messner (1994). „A Simple Method That Uses Differential Staining and Light Microscopy To Assess the Selectivity of Wood Delignification by White Rot Fungi“. In: *Applied and Environmental Microbiology* 60.4, S. 1383–1386.
- Stamm, A. J. (1964a). „Microscopic Structure of Wood“. In: *Wood and Cellulose Science*. Hrsg. von A. J. Stamm. New York: The Ronald Press Company, S. 3–33.

- Stamm, A. J. (1964b). „Sorption of Water Vapor by Cellulosic Materials“. In: *Wood and Cellulose Science*. Hrsg. von A. J. Stamm. New York: The Ronald Press Company, S. 142–165.
- (1964c). „The Phenomenon of Adsorption“. In: *Wood and Cellulose Science*. Hrsg. von A. J. Stamm. New York: The Ronald Press Company, S. 132–141.
- Steeger, F., J. Küppers & S. Brunkhorst (2017). „Schwel- und Brandverhalten von Wärmedämmverbundsystemen aus Holzfaserdämmstoffen“. In: *Bautechnik* 94.6, S. 361–367.
- Stevanovic, T. (2016). „Chemical Composition and Properties of Wood“. In: *Lignocellulosic fibers and wood handbook*. Hrsg. von N. Belgacem & A. Pizzi. Salem, Massachusetts: Scrivener Publishing & Wiley, S. 49–106.
- Stieß, M. (2009). *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie* 1. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Strickler, M. D. (1968). „High temperature moisture relations of grand fir“. In: *Forest Products Journal* 18.4, S. 69–75.
- T 401 om-03 (2008). *Fiber analysis of paper and paperboard*.
- Talebjedi, B., A. Khosravi, T. Laukkanen, H. Holmberg, E. Vakkilainen & S. Syri (2020). „Energy modeling of a refiner in thermo-mechanical pulping process using ANFIS method“. In: *Energies* 13.19, S. 5113.
- TAURUS Instruments AG (2018). *Betriebsanleitung TLP 900 (G)X*.
- Teleman, A. (2009). „Hemicelluloses and Pectins“. In: *Wood Chemistry and Technology*. Hrsg. von M. Ek, G. Gellerstedt & G. Henriksson. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin: De Gruyter, S. 102–120.
- Tian, H. (2020). „Stochastic multi-objective economic model predictive control of two-stage high consistency Mechanical Pulping Processes“. Dissertation. The University Of British Columbia.
- Tienvieri, T., E. Huusari, J. Sundholm, V. Petteri, J. Kortelainen, H. Nystedt & A. Artamo (1999). „Thermomechanical pulping“. In: *Mechanical pulping*. Hrsg. von J. Sundholm. Papermaking Science and Technology. Helsinki: Fapet Oy, S. 196–221.
- Tran, H., P. Doumalin, C. Delisée, J. C. Dupre, J. Malvestio & A. Germaneau (2013). „3D mechanical analysis of low-density wood-based fiberboards by X-ray microcomputed tomography and Digital Volume Correlation“. In: *Journal of Materials Science* 48.8, S. 3198–3212.
- Trendelenburg, R. & H. Mayer-Wegelin (1955). *Das Holz als Rohstoff*. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.
- Varhimo, A. & O. Tuovinen (1999). „Raw materials“. In: *Mechanical pulping*. Hrsg. von J. Sundholm. Papermaking Science and Technology. Helsinki: Fapet Oy, S. 67–104.
- VDI e.V., Hrsg. (2013). *VDI-Wärmeatlas*. 11. Auflage. Springer Reference. Berlin: Springer.
- Vehniäinen, A. (2008). „Single fiber properties - a key to the characteristics defibration patterns from wood to paper fibers“. Dissertation. Helsinki: Helsinki University of Technology.
- Verband Deutscher Papierfabriken e.V., Hrsg. (2001). *Qualitätsbestimmungen für Hackschnitzel zur Erzeugung von thermomechanischem Holzstoff (TMP) und Zellstoff (Sulfat/Sulfit)*.
- Vignon, P., M. H. Hobballah, H. Tran, J. Moreau, C. Delisée, M. Lecourt, R. Belalia & T. Sanguina (2016). „Thermal insulating materials made up of poplar wood fibres“. In: *2nd Conference on Engineered Wood Products Based on Poplar/Willow Wood CEWPPW2*. Hrsg. von J. van Acker. Ghent: University Press, S. 37–50.
- Vogel, K. (1999). „Die Eignung von Holz als Wärmedämmstoff: vergleichende Untersuchungen von Spänen und Fasern“. Dissertation. Ludwig-Maximilian-Universität München.
- Wagenführ, R. (2007). *Holzatlas*. 6. Aufl. Leipzig: Carl Hanser Verlag.
- Wagenführ, R. & A. Wagenführ (2008). „Anatomie des Holzes“. In: *Taschenbuch der Holztechnik*. Hrsg. von A. Wagenführ & F. Scholz. München: Carl Hanser Verlag, S. 14–47.

- Wahler, W. (1960). „Eine neue Prüfsiebmaschine nach dem Luftstrahlprinzip für beliebig viele Fraktionen“. In: *Tonindustrie-Zeitung und Keramische Rundschau* 84.4, S. 93–95.
- Wang, P., J. Yang & J. Wang (2017). „Computer simulation of refining process of a high consistency disc refiner based on CFD“. In: *AIP Conference Proceedings* 1864, 020079.
- Weber, A., A. Raphtel & U. Sonntag (2014). *Echtzeit-Charakterisierung von Holzpartikeln für die Qualitätssicherung und Prozessoptimierung bei der Herstellung von Holzpartikelwerkstoffen in der Holzwerkstoffindustrie - Quick Wood-Particle Size*. Hrsg. von Institut für Holztechnologie GmbH. Dresden.
- Wenderdel, C. (2015). „Herstellung mehrschichtiger Faserplatten im Trockenverfahren mit kartonähnlichen Eigenschaften“. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Wenderdel, C., E. Hesse, D. Krug, A. Hänsel & P. Niemz (2013). „Influence of surface roughness of wood fibres on properties of medium density fibreboards“. In: *Pro Ligno* 9.4, S. 423–429.
- Wenderdel, C. & D. Krug (2012). „Untersuchung zum Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die morphologische Ausprägung von aus Kiefernholz hergestelltem TMP-Faserstoff“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 70.1-3, S. 85–89.
- Wenderdel, C., D. Krug, H. Bartsch & M. Hielscher (2016a). *Untersuchung der Faser-Bindemittel-Wechselwirkung zur Herstellung von MDF aus Laubholz: Schlussbericht FKZ 22022211 (11NR222)*.
- Wenderdel, C., A. Weber, M. Hielscher, M. Pfaff & U. Sonntag (2016b). „Spezielle Methoden zur morphologischen Charakterisierung lignocelluloser Faserstoffe“. In: *Holztechnologie* 57.3, S. 16–22.
- Wenderdel, C., A. Weber, M. Pfaff, U. Sonntag & T. Theumer (2014). „Spezielle Methoden zur morphologischen Charakterisierung lignocelluloser Faserstoffe: Teil 1: Stand der Technik und theoretische Ableitung einer Partikelklassifizierung“. In: *Holztechnologie* 55.6, S. 12–19.
- Wenderdel, C., A. Weber, M. Hielscher & D. Krug (2017). „Spezielle Methoden zur morphologischen Charakterisierung lignocelluloser Faserstoffe: Teil 3: Einfluss der Fasermorphologie auf die Eigenschaften daraus erzeugter MDF“. In: *Holztechnologie* 58.1, S. 5–10.
- Wert, C. A., M. Weller & D. Caulfield (1984). „Dynamic loss properties of wood“. In: *Journal of Applied Physics* 56.9, S. 2453–2458.
- Winandy, J. E. & R. M. Rowell (2013). „Chemistry of wood strength“. In: *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Hrsg. von R. M. Rowell. Boca Raton: Taylor & Francis & CRC Press, S. 413–452.
- Yap, B. W. & C. H. Sim (2011). „Comparisons of various types of normality tests“. In: *Journal of Statistical Computation and Simulation* 81.12, S. 2141–2155.
- Yu, X., J. Minor & R. Atalla (1995). „Mechanism of action of Simons' stain“. In: *Tappi Journal* 78.6, S. 175–180.
- Zamil, M. S. & A. Geitmann (2017). „The middle lamella-more than a glue“. In: *Physical biology* 14.1, S. 015004.
- Zobel, B. J. & J. P. Buijtenen (2012). *Wood variation: Its causes and control*. Springer Series in Wood Science. Springer.

9 Danksagung

Die Dissertation entstand, neben meiner wissenschaftlichen Vollzeittätigkeit in den Laboren für Holzwerkstofftechnik sowie Kleb- und Presstechnik an der Technischen Hochschule Rosenheim, als externes Promotionsvorhaben in der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte an der Georg-August-Universität Göttingen. Das begleitende Forschungsvorhaben wurde durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. finanziell gefördert. Für die konstruktive, vertrauensvolle Zusammenarbeit insbesondere in der SARS-CoV2-Pandemie möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Beteiligten ausdrücklich bedanken.

Bei Herrn **Prof. Dr. Carsten Mai** möchte ich mich für das Interesse an dem Thema, die Unterstützung in fachlichen Fragen und die Chance als Externer promoviert zu werden bedanken. Herrn **Prof. Dr. Andreas Michanickl** möchte ich meinen Dank für sein Vertrauen, seine Unterstützung sowie die fachliche und persönliche Förderung aussprechen. Die Arbeit wurde auch durch die Bereitstellung von Informationen und Material durch institutionelle und industrielle Partner gefördert. Für die unkomplizierte, zuvorkommende Zusammenarbeit sowie die Hilfsbereitschaft und Unterstützung in technischen Fragen bedanke ich mich bei Herrn **Jörg Dahringer** (Trevira GmbH), Herrn **Felix Hermann** (Bayerische Staatsforsten), Herrn **Peter Mraz** (Andritz AG) und Herrn **Tobias Michel** (Andritz AG). Mein Dank gilt auch meiner Kollegin Frau **Mara Schumacher** für ihre Unterstützung beim Experimentieren mit der Laborrefineranlage und die Faseranalyse mit dem Luftstrahlsieb. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinem Kollegen Herrn **Thomas Schmid** für die Unterstützung beim Umbauen, Reparieren und Experimentieren mit der Laborrefineranlage. Meinem Kollegen Herrn **Siegfried Lechner** gilt mein Dank für die anpackende Problemlösung in praktischen und organisatorischen Fragen. Die gemeinsamen Holzfällungen behalte ich in freudiger Erinnerung. Den Kollegen aus der gemeinsamen Arbeitsgruppe Holz- und Kunststofftechnik Frau **Sabine Hummel**, Herrn **Sebastian Wiedl**, Herrn **Frederik Obermaier** sowie Herrn **Prof. Dr. Michael Schemme** und Herrn **Prof. Dr. Peter Karlinger** danke ich für den fachlichen Austausch und die konstruktive Zusammenarbeit. Den Studierenden Frau **Katja Bachmann**, Frau **Janine Bösing**, Herrn **Johannes Mai** und Herrn **Yannick Sattler** danke ich für ihre Hilfe bei der Literaturbeschaffung und der Durchführung praktischer Arbeiten.

Nicht genug danken kann ich meiner Ehefrau **Stephanie Barth** für ihre selbstlose Unterstützung in allen Fragen, ihrer Hingabe für **Paul** und **Annika** während meiner häufigen Abwesenheit und ganz besonders für den Mut und die Entscheidung das hier durchzuziehen.

10 Anhang

10.1 R-Codes zur Datenverarbeitung und graphischen Darstellung

Daten einlesen, filtern, sortieren (packages *{base}*, *{readxl}*):

```
#Excel-Datei einlesen
data_excel <- read_excel(path, sheet=1)

#Filtern nach einer bestimmten Variablen
data_filter <- data[!grepl(" ", data_excel$row)]

#Tabellen zusammenfuegen
data_bind <- rbind(data_excel1, data_excel2, data_excel3)
```

Varianzanalyse (ANOVA) (package *{stats}*):

```
data_aov <- aov(abhaengige Variable ~ unabhaengige Variable(n),
               data = subset(data_excel, x < " "))
)
```

Auf Normalverteilung überprüfen mit Shapiro-Wilk-Test (package *{stats}*) und Levene-Test (package *{car}*):

```
shapiro.test(resid(data_aov))
leveneTest(data_aov)
```

Normalverteilung und Homogenität der Varianzen gegeben: TukeyHSD-Test (package *{stats}*)

```
TukeyHSD(data_aov)
```

Keine Normalverteilung gegeben: Kruskal-Wallis-Test (package *{stats}*)

```
kruskal.test(abhaengige Variable ~ unabhaengige Variable(n),
             data = subset(data_excel,
                           xy == " "))
)
```

Paarweiser Wilcox (Mann-Whitney-U-Test, package *{ggpubr}*) zum Identifizieren signifikanter Unterschiede:

```
compare_means(method = "wilcox.test",
              abhaengige Variable ~ unabhaengige Variable(n),
              data = subset(data_excel, xy == " "))
)
```

Bereitstellung für die grafische Darstellung (package *{base}*):

```
#Signifikante Unterschiede durch Asteriske darstellen
cm_list <- list(c("Variable1", "Variable2"), c("Variable1", "Variable3"))

#Anzahl der Beobachtungen oberhalb von Boxplots anzeigen
give.n <- function(x){
  return(data.frame(y = #,
                    label = paste("n = ", length(x))))
}
```

```

}

#Mittelwerte oberhalb von Boxplots anzeigen
mean.n <- function(x){
  return(data.frame(y = #,
    label = paste("M = ", round(mean(x)))))
}

```

Punkt- und Balkendiagrammen und Boxplots (packages: {ggplot2}, {ggpubr}, {ggraph}, {ggrepel}, {plyr}, {tidyr}, {gridExtra}, {grDevices}, {scales}, {lattice})

```

#Beispiel Boxplot
boxplot <- ggplot(
  subset(data_excel,
    x < "*", select=c(*, *)), aes(x = *, y = *))+
  geom_boxplot()+
  stat_summary(fun = mean, shape=1, colour="black")+
  stat_summary(fun.data = give.n, geom = "text")+
  stat_summary(fun.data = mean.n, geom = "text")+
  stat_compare_means(comparisons = cm_list, label= "p.signif")+
  labs(title = "*")+
  scale_y_continuous(name = expression(atop(paste("*"))))+
  scale_x_discrete(name = expression(atop(paste("*"))))+
  theme(title = element_text(size = 14, colour = "black"),
    axis.title.x = element_text(margin=unit(c(.7,0,0,0),"cm"),
    size = 18, colour = "black"),
    axis.title.y = element_text(size = 18, colour = "black"),
    axis.text.x = element_text(size = 18, colour = "black"),
    axis.text.y = element_text(size = 18, colour = "black"),
    axis.ticks.length = unit(0.2, "cm"),
    axis.ticks = element_line(colour = "black", size = 0.8),
    panel.background = element_rect(fill = "white",
    colour = "black"),
    panel.grid = element_blank(),
    plot.margin = unit(c(1.5,1.5,0,0),"cm"),
    plot.background = element_rect(fill = "transparent",
    colour = NA))

```

Beschriftung und Legende (packages: {grid}, {gtable}):

```

labeltop <- textGrob(expression(atop(paste("*"))),
  gp=gpar(fontsize=18))

legend <- gtable_filter(
  ggplot_gtable(ggplot_build(**
  theme(legend.text = element_text(size=18,color = "black"),
    legend.title=element_blank(),
    legend.key.size=unit(1,"cm"),
    legend.position = "top",
    legend.key=element_rect(fill="white"),
    legend.background=element_rect(fill = "white",
    color = "white"),
    legend.direction="horizontal"))),
  "guide-box")

```

Grafikerstellung aus einzelnen und mehreren Plots, Beschriftung, Legenden und Indizes (package {cowplot}):

```

plot <- plot_grid(labels = c("auto"), label_fontfamily = "serif",
  label_size= 23, vjust= 1, boxplot1+

```

```

        theme(legend.position = "none"),
        boxplot2+
        theme(legend.position = "none",
              axis.title.y = element_blank()),
              ncol=2, rel_widths= c(1.1,1)
    )
png("*.png", height = 18, width = 32, units = "cm", res = 300)
grid.arrange(*)
dev.off()

```

Half-normal plot (Danielplot) (package {DoE.base}):

```

#Laden eines Versuchsplans
load("*.rda")

#Numerische Antwortvariablen zu einem Versuchsplan hinzufuegen
data <- add.response(response, "path",
                     replace=TRUE, InDec=",")

#Grafikherstellung
png("*.png", height = 18, width = 32, units = "cm", res = 300)
par(mfrow = c(1, 1), cex = 1.6, las = 1.5, font.main = 8,
    cex.main = 1.5, cex.axis = 1)
DanielPlot(data, code=TRUE, autolab=TRUE, alpha=0.1, half=TRUE, main = "",
           cex.pch=2, cex.legend = 1.1)
mtext(line=0, text=letters[1], side=3, adj=-0.06, font=7, cex = 2)
dev.off()

```

Main-effects plot (package {RcmdrPlugin.DoE}):

```

png("*.png", height = 18, width = 32, units = "cm", res = 300)
par(mfrow = c(1, 4), cex = 1.6, las = 1.2, font.main = 8,
    cex.main = 1.2, cex.axis = 0.8, mar = c(4,5,4,1)
    )
plotMeans(data$mean, data$*, error.bars="none", main="",
          xlab="*", ylab=expression(paste("*")),
          xlim = c(,#), ylim = c(,#)
          )
mtext(text=letters[2], side=3, adj=-0.6, font=7, cex = 2)
dev.off()

```

Korrelationstabellen (packages {corrplot}, {xtable}):

```

data <- as.data.frame(data_excel)
data_sub <- subset(data, x=="*",
select = -c(Spalte1, Spalte2))
data_cor <- round(cor(data_sub, use = "na.or.complete",
method = "pearson"),2)
upper <- data_cor
upper[upper.tri(data_cor)]<-" "
upper<-as.data.frame(upper)
#Korrelationstabelle als Latex-Tabelle in Console ausgeben
print(xtable(upper), type="latex")

#The following code of corstars function can be found under:
#http://www.sthda.com/english/wiki/elegant-correlation-table-using-xtable-r-package
# x is a matrix containing the data
# method : correlation method. "pearson" or "spearman" is supported
# removeTriangle : remove upper or lower triangle
# results : if "html" or "latex"

```



```

# the results will be displayed in html or latex format
corstars <-function(x, method=c("pearson", "spearman"),
  removeTriangle=c("upper", "lower"),
  result=c("none", "html", "latex")){
#Compute correlation matrix
require(Hmisc)
x <- as.matrix(x)
correlation_matrix<-rcorr(x, type=method[1])
R <- correlation_matrix$r # Matrix of correlation coefficients
p <- correlation_matrix$p # Matrix of p-value

## Define notions for significance levels; spacing is important.
mystars <- ifelse(p < .0001, "****", ifelse(p < .001, "*** ",
  ifelse(p < .01, "**  ", ifelse(p < .05, "*   ", "    "))))

## truncate the correlation matrix to two decimal
R <- format(round(cbind(rep(-1.11, ncol(x)), R), 2))[, -1]

## build a new matrix that includes the correlations with their
appropriate stars
Rnew <- matrix(paste(R, mystars, sep=""), ncol=ncol(x))
diag(Rnew) <- paste(diag(R), " ", sep="")
rownames(Rnew) <- colnames(x)
colnames(Rnew) <- paste(colnames(x), "", sep="")

## remove upper triangle of correlation matrix
if(removeTriangle[1]=="upper"){
  Rnew <- as.matrix(Rnew)
  Rnew[upper.tri(Rnew, diag = TRUE)] <- ""
  Rnew <- as.data.frame(Rnew)
}

## remove lower triangle of correlation matrix
else if(removeTriangle[1]=="lower"){
  Rnew <- as.matrix(Rnew)
  Rnew[lower.tri(Rnew, diag = TRUE)] <- ""
  Rnew <- as.data.frame(Rnew)
}

## remove last column and return the correlation matrix
Rnew <- cbind(Rnew[1:length(Rnew)-1])
if (result[1]=="none") return(Rnew)
else{
  if(result[1]=="html") print(xtable(Rnew), type="html")
  else print(xtable(Rnew), type="latex")
}
}

corstars(data_sub, result="latex")

```

10.2 Korrelationen mit der Wärmeleitfähigkeit

Korrelationen mit der Beschaffenheit der Faserstoffe nach der Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung

Tabelle 10.1: Korrelationsmatrix Fichten-Faserstoffe: Aufschluss-temperatur, SEL, Beschaffenheit nach der Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung und Wärmeleitfähigkeit.

	T	SEL	Eff	x _{50,3}	x _{97,3}	x ₃	mx ₃
T							
SEL	-0.63**						
EFF	0.36	-0.71**					
x _{50,3}	-0.16	-0.26	0.62*				
x _{97,3}	-0.12	-0.14	0.48	0.86****			
x ₃	-0.03	-0.17	0.38	0.71**	0.97****		
mx ₃	-0.16	-0.13	0.53	0.92****	0.99****	0.93****	
λ ₁₀	-0.72**	0.81***	-0.40	0.04	0.16	0.10	0.18

Abkürzungen: T = Aufschluss-temperatur, SEL = spezifische elektrische Leistungsaufnahme, Eff = Effizienz, x_{50,3} = Medianwert Prüfsieb-Maschenweite, x_{97,3} = 97 %-Perzentil Prüfsieb-Maschenweite, x₃ = Partikel-ausdehnungsintervall, mx₃ = mittlere Partikel-ausdehnung, λ₁₀ = Wärmeleitfähigkeit.
Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *

Tabelle 10.2: Korrelationsmatrix Buchen-Faserstoffe: Aufschluss-temperatur, SEL, Beschaffenheit nach der Kollektivmethode Luftstrahl-Prüfsiebung und Wärmeleitfähigkeit.

	T	SEL	Eff	x _{50,3}	x _{97,3}	x ₃	mx ₃
T							
SEL	-0.63*						
Eff	0.45	-0.72**					
x _{50,3}	-0.86***	0.45	-0.29				
x _{97,3}	-0.66*	0.68*	-0.39	0.65*			
x ₃	-0.56	0.69*	-0.37	0.48	0.98****		
mx ₃	-0.77**	0.69*	-0.39	0.76**	0.99****	0.93****	
λ ₁₀	-0.81***	0.93****	-0.70**	0.69*	0.70**	0.68*	0.78**

Abkürzungen: T = Aufschluss-temperatur, SEL = spezifische elektrische Leistungsaufnahme, Eff = Effizienz, x_{50,3} = Medianwert Prüfsieb-Maschenweite, x_{97,3} = 97 %-Perzentil Prüfsieb-Maschenweite, x₃ = Partikel-ausdehnungsintervall, mx₃ = mittlere Partikel-ausdehnung, λ₁₀ = Wärmeleitfähigkeit.
Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *

Korrelationen mit der Beschaffenheit der Faserstoffe nach der Individualmethode quantitative Bildanalyse

Tabelle 10.3: Korrelationsmatrix Fichten-Faserstoffe: Aufschlussstemperatur, SEL, Beschaffenheit nach der Individualmethode quantitative Bildanalyse und Wärmeleitfähigkeit.

	T	SEL	fa	T _{50,fa}	T _{fa}	mT _{fa}	kf	FB	LF	KF	GS	FS
T												
SEL	-0.63**											
fa	0.29	-0.67**										
T _{50,fa}	-0.23	-0.08	0.31									
T _{fa}	-0.51*	0.05	0.31	0.91****								
mT _{fa}	-0.45	0.02	0.30	0.96****	0.99****							
kf	-0.29	0.67**	-1.00****	-0.31	-0.31	-0.30						
FB	-0.08	0.25	-0.52*	-0.58*	-0.60*	-0.57*	0.52*					
LF	0.10	-0.44	0.70**	0.71**	0.68**	0.68**	-0.70**	-0.93****				
KF	0.23	0.00	0.27	-0.36	-0.23	-0.32	-0.27	-0.34	0.08			
GS	-0.26	0.51*	-0.92****	-0.25	-0.26	-0.23	0.92****	0.61*	-0.70**	-0.44		
FS	-0.29	0.71**	-0.98****	-0.33	-0.32	-0.31	0.98****	0.46	-0.67**	-0.18	0.83****	
λ ₁₀	-0.72**	0.81***	-0.27	0.23	0.40	0.35	0.27	-0.16	-0.01	0.19	0.11	0.33

Abkürzungen: T = Aufschlussstemperatur, SEL = spezifische elektrische Leistungsaufnahme, fa = faserartig, T_{50,fa} = Medianwert Dicke faserartig, T_{fa} = Ausdehnung Dicke faserartig, mT_{fa} = mittlere Dicke faserartig, kf = kornförmig, FB = Faserbündel, LF = Langfaser, KF = Kurzfaser, GS = Grobstoff, FS = Feinstoff, λ₁₀ = Wärmeleitfähigkeit.

Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *

Tabelle 10.4: Fortsetzung der Korrelationsmatrix Fichten-Faserstoffe: Aufschluss-temperatur, SEL, Beschaffenheit nach der Individualmethode quantitative Bildanalyse und Wärmeleitfähigkeit.

	T	SEL	L _{50,fa}	L _{FB}	mL _{FB}	T _{50,FB}	T _{FB}	mT _{FB}	E _{50,FB}	E _{FB}	mE _{FB}
T											
SEL	-0.63**										
L _{50,fa}	-0.23	0.11									
L _{FB}	-0.24	0.13	0.99****								
mL _{FB}	-0.30	0.17	0.93****	0.96****							
T _{50,FB}	0.01	0.05	-0.02	0.00	-0.02						
T _{FB}	-0.17	0.15	0.08	0.10	0.09	0.97****					
mT _{FB}	-0.29	0.18	0.12	0.14	0.16	0.91****	0.97****				
E _{50,FB}	0.21	-0.10	-0.97****	-0.95****	-0.88****	0.06	-0.05	-0.13			
E _{FB}	0.19	-0.20	-0.95****	-0.95****	-0.88****	-0.06	-0.13	-0.16	0.93****		
mE _{FB}	0.16	-0.24	-0.88****	-0.89****	-0.81****	-0.12	-0.17	-0.16	0.84****	0.98****	
λ ₁₀	-0.72**	0.81***	0.03	0.01	0.01	0.19	0.30	0.37	-0.08	-0.07	-0.08

Abkürzungen: T = Aufschluss-temperatur, SEL = spezifische elektrische Leistungsaufnahme, L_{50,fa} = Medianwert Länge Faserbündel, L_{FB} = Ausdehnung Länge Faserbündel, mL_{FB} = mittlere Länge Faserbündel, T_{50,FB} = Medianwert Dicke Faserbündel,

T_{FB} = Ausdehnung Dicke Faserbündel, mT_{FB} = mittlere Dicke Faserbündel, E_{50,FB} = Medianwert Elongation Faserbündel,

E_{FB} = Ausdehnung Elongation Faserbündel, mE_{FB} = mittlere Elongation Faserbündel, λ₁₀ = Wärmeleitfähigkeit.

Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *

Tabelle 10.5: Korrelationsmatrix Buchen-Faserstoffe: Aufschlussstemperatur, SEL, Beschaffenheit nach der Individualmethode quantitative Bildanalyse und Wärmeleitfähigkeit.

	T	SEL	fa	T _{50,fa}	T _{fa}	mT _{fa}	kf	FB	LF	KF	GS	FS
T	-0.63*											
SEL	0.45	-0.15										
fa	-0.95****	0.57*	-0.35									
T _{50,fa}	-0.91****	0.56*	-0.25	0.98****								
T _{fa}	-0.95****	0.58*	-0.31	1.00****	0.99****							
mT _{fa}	-0.45	0.15	-1.00****	0.35	0.25	0.31						
kf	0.54	-0.03	0.56*	-0.62*	-0.58*	-0.60*	-0.56*					
FB	0.36	-0.62*	0.12	-0.27	-0.25	-0.27	-0.12	-0.44				
LF	-0.69**	0.25	-0.32	0.82****	0.80****	0.81****	0.32	-0.90****	0.22			
KF	0.02	-0.13	-0.81****	-0.11	-0.19	-0.15	0.81****	-0.46	0.25	0.10		
GS	-0.61*	0.26	-0.96****	0.52	0.42	0.48	0.96****	-0.54	-0.28	0.39	0.62*	
FS	-0.81****	0.93****	-0.23	0.73**	0.72**	0.74**	0.23	-0.09	-0.68*	0.32	-0.16	0.39

Abkürzungen: T = Aufschlussstemperatur, SEL = spezifische elektrische Leistungsaufnahme, fa = faserartig, T_{50,fa} = Medianwert Dicke faserartig, T_{fa} = Ausdehnung Dicke faserartig, mT_{fa} = mittlere Dicke faserartig, kf = kornförmig, FB = Faserbündel, LF = Langfaser, KF = Kurzfaser, GS = Grobstoff, FS = Feinstoff, λ₁₀ = Wärmeleitfähigkeit.
Signifikanzcode: 0,0001 ****; 0,001 ***; 0,01 **; 0,05 *

Tabelle 10.6: Fortsetzung der Korrelationsmatrix Buchen-Faserstoffe: Aufschlussrate, SEL, Beschaffenheit nach der Individualmethode quantitative Bildanalyse und Wärmeleitfähigkeit.

	T	SEL	L _{50,fa}	L _{FB}	mL _{FB}	T _{50,FB}	T _{FB}	mT _{FB}	E _{50,FB}	E _{FB}	mE _{FB}
T	-0.63*										
SEL	0.84***	-0.73**									
L _{50,fa}	0.69**	-0.65*	0.96***								
L _{FB}	0.48	-0.55	0.74**	0.87***							
mL _{FB}	-0.97***	0.61*	-0.82***	-0.68*	-0.42						
T _{50,FB}	-0.97***	0.64*	-0.81***	-0.65*	-0.38	1.00***					
T _{FB}	-0.88***	0.71**	-0.70**	-0.49	-0.17	0.91***	0.94***				
mT _{FB}	-0.97***	0.63*	-0.92***	-0.82***	-0.60*	0.97***	0.96***	0.83			
E _{50,FB}	-0.85***	0.50	-0.91***	-0.86***	-0.60*	0.89***	0.87***	0.70**	0.95***		
E _{FB}	-0.48	0.18	-0.70**	-0.74**	-0.47	0.58*	0.54	0.34	0.67*	0.86***	
mE _{FB}	-0.81***	0.93***	-0.81***	-0.69**	-0.51	0.78**	0.81***	0.85***	0.78**	0.63*	0.25
λ ₁₀											

Abkürzungen: T = Aufschlussrate, SEL = spezifische elektrische Leistungsaufnahme, L_{50,fa} = Medianwert Länge Faserbündel, L_{FB} = Ausdehnung Länge Faserbündel, mL_{FB} = mittlere Länge Faserbündel, T_{50,FB} = Medianwert Dicke Faserbündel, T_{FB} = Ausdehnung Dicke Faserbündel, mT_{FB} = mittlere Dicke Faserbündel, E_{50,FB} = Medianwert Elongation Faserbündel, E_{FB} = Ausdehnung Elongation Faserbündel, mE_{FB} = mittlere Elongation Faserbündel, λ₁₀ = Wärmeleitfähigkeit.

Signifikanzcode: 0,0001 ***; 0,001 **; 0,01 *; 0,05 *

10.3 Veröffentlichungen

1. Barth, S., Hartmann, M., Rudolph, M., Karlinger, P., Michanickl & A., Schemme, M. (2016). „Zusammen Maßnahmen. Verfahrensentwicklung zum Hinterspritzen von Holzfurnieren am Beispiel eines Zollstocks“. In: *Kunststoffe* 7/2016, S. 80-83.
2. Barth, S. & Michanickl, A. (2017). „Fasergeometrien für Faserverbundwerkstoffe mit geringer Dichte“. Vortrag. In: 12. Holzwerkstoffkolloquium, Institut für Holztechnologie, Dresden.
3. Barth, S., Vega, J., Fuentealba, C. & Michanickl, A. (2018). „Fiber insulation materials from Eucalyptus bark fibers – first results“. Vortrag. In: 5th International Conference on Processing Technologies for Forest and Biobased Industries (PTF BPI), Technische Universität München, Freising.
4. Barth, S., Vega, J., Fuentealba, C. & Michanickl, A. (2018). „Fiber insulation materials from Eucalyptus bark fibers – first results“. In: *Pro Ligno* 14.4, S. 3-8.
5. Barth, S. & Michanickl, A. (2018). „Möglichkeiten zur Optimierung der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen“. Vortrag. In: 3. Kooperationsforum Holz als neuer Werkstoff, Bayern Innovativ, Regensburg.
6. Barth, S. & Michanickl, A. (2019). „Importance of refiner plates for wood fiber insulation materials“. Vortrag. In: *International Wood Days 2019*, LAMK, Lahti, Finland.
7. Schmid, T., Barth, S. & Michanickl, A. (2019). „Wood fiber composites for lightweight construction“. Vortrag. In: *International Wood Days 2019*, LAMK, Lahti, Finland.
8. Barth, S. & Michanickl, A. (2019). „Study of refiner plates as a possibility to improve the production of wood fiber insulation materials“. Vortrag. In: *SWST 62nd International Convention, Society for Wood Science and Technology, Fish Camp (CA), USA*.
9. Obermeier, F., Schumacher, M., Barth, S., Karlinger, P., Schemme, M. & Michanickl, A. (2019). „Thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfaserverstärkung“. Vortrag. In: *Internationale Fachtagung Technomer*, Technische Universität Chemnitz.
10. Barth, S., Schmid, T. & Michanickl, A. (2019). „Bindemiteinsatz und Mahlplattenentwicklung in der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen“. Vortrag. In: 13. Holzwerkstoffkolloquium, Institut für Holztechnologie, Dresden.
11. Obermeier, F., Schumacher, M., Barth, S., Karlinger, P., Schemme, M. & Michanickl, A. (2019). „Thermoplastische Holzfaservliese für Hybridverbunde“. Vortrag. In: 13. Holzwerkstoffkolloquium, Institut für Holztechnologie, Dresden.
12. Schumacher, M., Obermeier, F., Barth, S., Karlinger, P., Michanickl, A. & Schemme, M. (2020). „Eignung von thermo-mechanischen Holzfasern in Vliesstoffhybridverbunden“. In: *Holztechnologie* 61.2, S. 40-45.
13. Barth, S. & Michanickl, A. (2020). „Refiner plates for wood fiber based materials“. Vortrag. In: *International Wood Days 2020*, LAMK, Lahti, Finland.

14. Schmid, T., Barth, S. & Michanickl, A. (2020): „Wood fiber reinforced composites & nonwovens. New perspectives on the usage of wood fibers“. Vortrag. In: *International Wood Days 2020*, LAMK, Lahti, Finland.
15. Obermeier, F., Schumacher, M., Barth, S., Karlinger, P., Schemme, M. & Michanickl, A. (2020). „Thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfaserverstärkung: Leichtbau mit Naturfasern“. In: *Plastverarbeiter 2/2020*, S. 34-36.
16. Obermeier, F., Schumacher, M., Barth, S., Karlinger, P., Michanickl, A., Schemme, M. & Altstädt, V. (2021). „Verstärkung von Polypropylen mit Holzfaser durch Direkt-Compoundierung“. In: *Zeitschrift Kunststofftechnik 17.2*, S. 88-111.
17. Barth, S., Schmid, T. & Michanickl, A. (2021). „A method to determine the wetting of wood fibers with thermoplastic“. In: *Wood and Fibre Science 53.2*, S. 157-159.