

Abschlussbericht INFOR 174

Bewertung der Potenziale zur Energieeinsparung und zur Faserstoffqualität beim Nasspressen



Berichtersteller

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Naujock



Dipl.-Ing. Lutz Hamann



Projektbegleiter

O. Bruder; proNARO GmbH Stockstadt
A. Fried, DS Smith Packaging Containerboard
Dr. D. Rhodius, Schöllershammer AG
S. Pudack, Papierfabrik Adolf Jass Schwarza GmbH
Dr. J. Oberndorfer, UPM Research, Augsburg

Das Forschungsprojekt wurde gefördert durch das Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), Bonn

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	3
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Bindung von Wasser an Cellulosestrukturen	4
2.1.1 Mechanisch entfernbares Wasser.....	4
2.1.2 Strömung in kapillar-porösen Medien	6
2.1.2 Thermische Trocknung	6
2.2 Kurzer Abriß zum Stand der Technologie des Naßpressens für hohe Trockengehalte.....	8
2.2.1 Bauarten und Pressenanordnungen.....	8
2.2.2 Prozeßparameter und erreichte Trockengehalte.....	10
2.3 Aufbau und Funktion des Voith-FiberXPress.....	11
2.4 Theoretische Grundlagen des DSC-Verfahrens	13
2.5 Theoretische Grundlagen zur Bewertung der Fasermorphologie.....	14
3 Methodik und Durchführung.....	15
3.1 Auswahl der Faserstoffe.....	15
3.2 Überblick über die Arbeitspakete.....	16
3.3 Allgemeine papierphysikalische Prüfungen	17
3.3.1 SR-Wert und WRV	17
3.3.2 Dicke und Rohdichte.....	17
3.3.3 Zugfestigkeit	18
3.4 Trocknung der Pellets.....	18
3.5 Bewertung der Recyclingfähigkeit.....	18
3.5.1 DMA-Verfahren	19
3.5.2 Fasermorphologie.....	20
3.5.3. Differenzialkalorimetrie (DSC-Verfahren)	20
3.5.4 Weitere von der PTS verwendete Prüfmethoden	22
4 Ergebnisse.....	22
4.1 Bewertung der Eigenschaftskennwerte der Substrate	22
4.2 Experimentelle Lösungswege für die Entwässerung mit dem FiberXpress.....	28
4.2.1 Vorentwässerung	28
4.2.2 Hauptentwässerung	30
4.2.3 Flächenbezogene Masse der Pellets	33
4.3 Permeabilitätseigenschaften der Substrate.....	34
4.4 Kennwerte für den Entwässerungsvorgang	36

4.5 Transformation auf produktionsrelevante flächenbezogene Massen.....	37
4.6 Bewertung der Recyclingfähigkeit der gepreßten Proben	38
4.6.1 Dichte und Trockengehalte der gepressten Pellets.....	38
4.6.2 Fasermorphologie.....	42
4.6.3 Wasserrückhaltevermögen	50
4.6.4 Ergebnisse der Differenzialkalorimetrie	54
4.6.4 Recyclingversuche am Substrat Zeitungen und Zeitschriften	62
4.7 Verfahrenstechnische Randbedingungen für ein neues Pressenkonzept.....	66
4.8 Betrachtungen zur energetischen Effizienz und Einsparpotenziale.....	67
5 Zusammenfassung.....	70
Literaturverzeichnis HM	71
Literaturverzeichnis PTS	72

1 Einleitung

In der CEPI-Roadmap 2050 wird festgestellt, dass die Papiertrocknung allein verantwortlich ist für den Verbrauch von bis zu 70% der in der Zellstoff- und Papierindustrie eingesetzten fossilen Energieträger (CEPI, 2011). Stand der Technik ist derzeit der Einsatz von Gleitflächenpressen (Schuhpressen). Diese erreichen unter günstigen Bedingungen Trockengehalte von 55%. Schon in der Vergangenheit gab es Überlegungen, den Bahntrockengehalt wesentlich über dieses Niveau anzuheben. Dabei bediente man sich Synergien zwischen intensiver mechanischer Entwässerung und thermischer Energie. Die daraus resultierenden Systeme zur Impuls- bzw. Preßtrocknung haben sich bisher nicht nennenswert in der Papierindustrie etablieren können.

Voraussetzung für sinnvolle Zielstellungen zur Energieeinsparung im Sinne der CEPI Roadmap 2050 ist es, für die Teilprozesse der Papierherstellung den physikalisch notwendigen Energiebedarf zu kennen und durch technische Lösungen sich diesem möglichst direkt anzunähern. Dies gilt auch für den Naßpressvorgang, der im Vergleich zur thermischen Trocknung etwa um den Faktor fünf energetisch günstiger ist. So kann eine über das derzeitig technisch erreichbare Niveau wesentlich hinausreichende Steigerung des Trockengehalts der Papierbahn dazu beitragen, bedeutende Mengen thermischer Energie in der Trockenpartie einzusparen.

Ziel des Vorhabens ist es, aufzuzeigen, welche Potenziale zur Energieeinsparung beim Vorgang des Nasspressens feuchter Papierbahnen auf rein mechanischem Wege vorhanden sind und mit welchen Prozessparametern diese erreichbar werden. Ein verfahrenstechnisch begründeter Lösungsvorschlag zur Pressenentwicklung wird erarbeitet. Die Entwässerung erfolgt dabei mit einem Pressensimulator im Labor wesentlich intensiver als derzeit in Papiermaschinen möglich. Aus diesem Grund stellt sich auch die Frage, welche physikalischen Veränderungen die Papierfasern erfahren und welche Auswirkungen auf das Recycling es möglicherweise gibt.

Es hat sich gezeigt, dass konventionelle Modelle der Verfahrenstechnik zur Beschreibung der Durchströmung kapillar-poröser Güter nicht ohne weiteres auf den Naßpreßvorgang anwendbar sind, da sie einen Zustand unterstellen, bei dem Strömungswege und Kapillardurchmesser konstant bleiben. Zur Bewertung des Strömungswiderstandes beim Naßpressen wurde deshalb ein eigenes Modell entwickelt. Als Faserstoffe wurden ausgewählt ein Rohpapier für Fluting auf Altpapierbasis (Repräsentant für Verpackungspapiere), eine Mischung aus je 50% Zeitungen und Zeitschriften (Repräsentant für DIP-Stoff), TMP (Repräsentant für strukturdruckbegrenztes Pressen) und eine Mahlreihe eines Kiefern-Fichten-Sulfatzellstoffs (repräsentativ für durchflußbegrenztes Pressen).

2 Theoretische Grundlagen

Um das Einsparpotenzial bei der Papiertrocknung einschätzen zu können, ist es notwendig, die physikalischen Grenzen, die für eine rein mechanische Entwässerung vorgegeben sind, möglichst genau zu erfassen. Diese Grenzen ergeben sich aus einem dreiseitigen Verhältnis bei dem einerseits das Substrat, andererseits die Prozessparameter und die maschinenbauliche Lösung Rolle spielen. Im Folgenden soll daher den Faktoren nachgegangen werden, die die Wasser Retention an Cellulosefasern bestimmen. Weiterhin soll dargestellt werden, welche Leistungen heute durch Pressenkonstruktionen bereits erreicht werden, welche labortechnischen Lösungen für den Nasspressvorgang existieren und wie abgeschätzt werden kann, ob intensiv gepresste Fasern für das Recycling geeignet sind.

2.1 Bindung von Wasser an Cellulosestrukturen

in einem Vlies aus Cellulosefasern kann Wasser auf folgende Weise gebunden sein:

- Oberflächenwasser
- Kapillarwasser
- Quellwasser
- Konstitutionswasser.

Oberflächenwasser kann unter normalen Bedingungen (Temperatur 20 °C) bei völliger Sättigung des Vlieses eine immobilisierte Schicht von ca. 0,1 mm Dicke bilden. Kapillarwasser findet sich in inter- und intrafibrillären Hohlräumen. Zu den letzteren gehören die Faserporen und das Lumen. Quellwasser ist bereits chemisch an die Faser gebunden, wobei im Allgemeinen davon auszugehen ist, dass hier Bindungen dominieren, die eine niedrige Bindungsenergie besitzen. Dies können zum Beispiel Wasserstoffbrückenbindungen oder van der Waals Bindungen sein. Das Konstitutionswasser - oder möglicherweise besser Inklusionswasser - ist direkt in die Cellulosestruktur eingebunden. Wasser aller Bindungsarten kann auf thermischem Wege entfernt werden. Für die Entfernung des Konstitutionswassers sind allerdings sehr hohe Temperaturen notwendig, die in der Regel zur Zerstörung der Cellulosestruktur führen. Oberflächenwasser und Kapillarwasser lassen sich mit mechanischen Mitteln sehr weitgehend entfernen. Eine vollständige Entfernung ist jedoch nicht möglich. Dieses Ergebnis liefert zum Beispiel eine Plausibilitätsbetrachtung, die man anhand der Gleichung von Hagen-Poiseuille vornehmen kann. Dabei zeigt sich, dass Porenradien stets größer Null sind, also Wasser enthalten können, solange endliche Drücke vorherrschen.

2.1.1 Mechanisch entfernbare Wasser

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt festgestellt, kann die mechanische Wasserentfernung die größten Teile des Oberflächenwassers und des Kapillarwassers erfassen. Um die Entwässerung in Gang zu setzen, bedarf es einer Triebkraft. Diese Triebkraft ist eine Druckdifferenz, die auf folgenden Wegen erzeugt werden kann:

- Anlegen eines Vakuums
- Zentrifugalbeschleunigung
- äußerer Pressdruck.

Eine analytische Methode, um das chemisch an die Fasern gebundene Wasser zu bestimmen, ist die etablierte Messung des Wasserrückhaltevermögens. Diese Methode unterstellt, dass mithilfe einer Zentrifugenbeschleunigung von 3000 g alles mit mechanischen Mitteln entfernbar Wasser aus einem Filterkuchen auch entfernt wurde. Die Massendifferenz des feuchten zentrifugierten Filterkuchens zu seiner trockenen Masse soll dann die relative Menge des Quellwassers abbilden. Die Auswertung geschieht nach folgender Formel:

$$WRV = \frac{m_f - m_t}{m_t} (100\%) \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

m_f Masse des feuchten Filterkuchens nach dem Zentrifugieren

m_t Masse des ofentrockenen Filterkuchens

WRV.... Wasserrückhaltevermögen (in Prozent).

Die Methode zur Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens wurde 1953 von JAYME entwickelt. Sie ist dem Zellcheming-Merkblatt **IV/33/57** dokumentiert. Untersuchungen an Faserstoffen bei wesentlich höheren Zentrifugenbeschleunigungen haben gezeigt, dass 3000 g nicht ausreichen, um alles mechanisch entfernbare Wasser auch zu entfernen. Dies soll **Abbildung 1** verdeutlichen. Bei den dargestellten Versuchen wurden Zentrifugenbeschleunigungen bis zu 57.000 g realisiert. Die untersuchten Substrate waren ein Altpapierstoff (OCC) ungemahlen und 15 bzw. 35 Minuten in der JOKRO- Mühle gemahlen, weiterhin ein ungemahlener Fichtensulfizellstoff. Es wird deutlich, dass das WRV mit zunehmender Zentrifugenbeschleunigung abnimmt. Dies bedeutet, dass die erreichbaren Trockengehalte nach dem Zentrifugieren zunehmen. Die Unterschiede sind umso deutlicher, wenn der Faserstoffe bereits vor dem Zentrifugieren viel Wasser gebunden hat. Dies zeigt sich am gemahlenen Altpapierstoff. Der Verlauf der Kurven lässt erkennen, dass bei einer weiteren Erhöhung der Zentrifugenbeschleunigung auch noch mit weiteren Anstiegen des Trockengehaltes gerechnet werden kann. Allerdings wird das Inkrement immer geringer.

Aufgrund der vorgenannten Erkenntnisse erschien es sinnvoll, nach Methoden zu suchen, die eine weitergehende Wasserentfernung mit mechanischen Mitteln aus dem Faserstoffe erlauben. Damit sollte die physikalische Grenze, die offensichtlich für mechanisch entfernbare Wasser existiert, besser abgebildet werden.

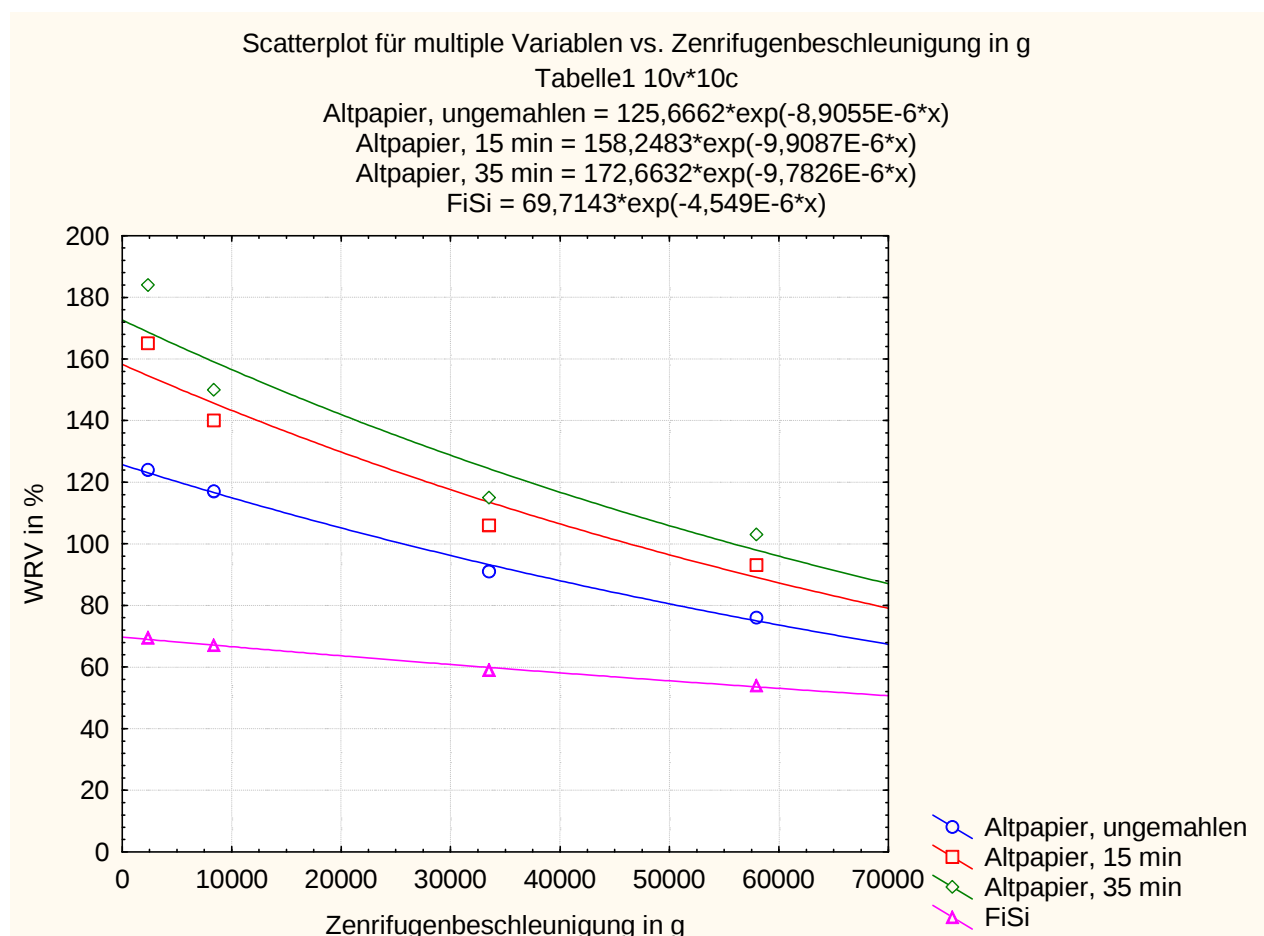


Abbildung 1: WRV Werte ausgewählter Faserstoffe bei hohen Zentrifugenbeschleunigungen

Im Rahmen einer Diplomarbeit (Wendt C. , 2007, S. 10) wurde mit der Firma Voith ein Gerät entwickelt, das der Simulation von Pressvorgängen dienen sollte. Die ursprüngliche Zielstellung bestand darin,

eine Aussage zu treffen, welchen Trockengehalt ein Kunde erwarten darf, wenn er eine bestimmte Pressenkonfiguration bei einem vorgegebenen Substrat bestellt. Das Potenzial dieses Gerätes ist jedoch weit höher, als die Definition bestimmter Garantiewerte erfordert. Aufgrund sehr hoher Drücke, die applizierbar sind, bestand die Aussicht, dem physikalisch vorgegebenen Grenzwert für die mechanische Entwässerung sehr nahe zu kommen. Das Gerät entwässert einen Faserstoffkuchen mit Drücken von bis zu 10 MPa. Im Vergleich dazu arbeitet Methode zur WRV-Bestimmung mit ca. 500 kPa. Dieser Entwässerungsdruck steht aber nur am Anfang zur Verfügung und fällt mit wachsender Wasserentfernung durch die sich verringernde Masse im Zentrifugalfeld kontinuierlich. Damit ist die Erwartung gerechtfertigt, physikalische Grenzen mit Hilfe des FiberXPress besser abbilden zu können.

2.1.2 Strömung in kapillar-porösen Medien

Zur Beschreibung der Strömung in kapillar-porösen Medien existieren in der Verfahrenstechnik zwei analytische Ansätze. Der erste ist die d'Arcy-Gleichung, die ursprünglich zur Beurteilung der Ergiebigkeit von Brunnen benutzt wurde. Sie lautet:

$$\dot{V} = k \frac{A \Delta p}{\eta l} \quad (2)$$

Dabei bedeuten:

$\dot{V}$Volumenstrom

k....Permeabilitätskonstante

A....wirksame Fläche

ΔpDruckdifferenz

ηdynamische Viskosität

l....Länge der Kapillaren.

Die zweite Gleichung stammt von Hagen – Poiseuille für den gleichen Sachverhalt. Sie lautet:

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad (3)$$

Dabei ist r der Radius der Kapillaren. Für den Vorgang des Nasspressens bei der Papierherstellung konnten in der Literatur keine Werte für die Permeabilitätskonstante und den Kapillarradius gefunden werden. Beide Werte wären wichtig für die Umrechnung der Flächenmassen, die sich im FiberXPress ergeben (1000 g/m² bis 4000 g/m²) und realen Produktionskennwerten. Der Nachteil beider Ansätze besteht darin, dass sie die eintretende Verdichtung bei der Pressung nicht abbilden können. Es besteht aber die Möglichkeit, wenigstens zu Beginn des Pressvorgangs diese Kennwerte zu bestimmen. Zu beachten ist weiterhin, dass die Gleichungen (2) und (3) für den Bereich laminarer Strömungen definiert sind. Aufgrund der sehr geringen Kapillardurchmesser ist die Bedingung $Re < 2300$ praktisch immer erfüllt.

2.1.2 Thermische Trocknung

Aus verfahrenstechnischer Sicht ist Papier ein kapillar-poröses Gut. In der nachfolgenden **Abbildung 2** ist der prinzipielle Trocknungsverlauf dargestellt (Schwister & Leven, 2014).

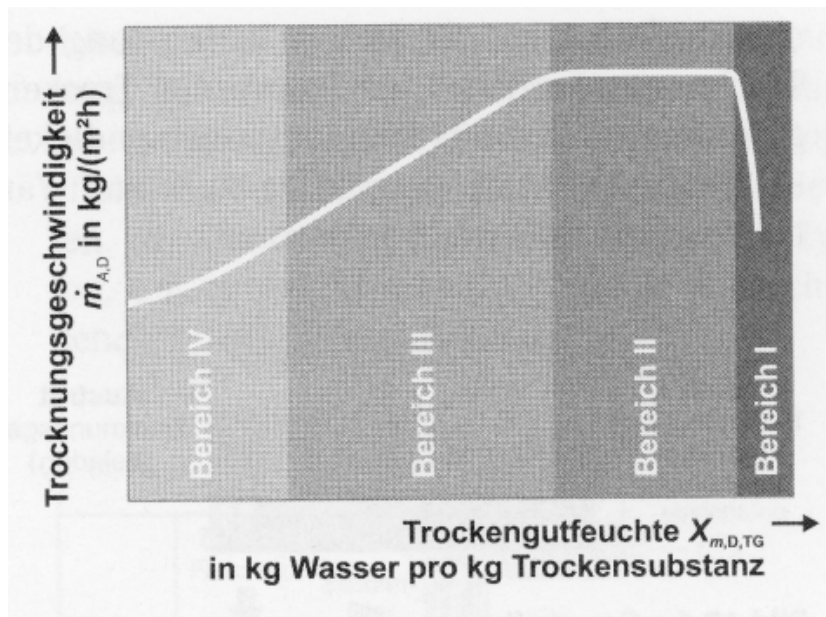


Abbildung 2: Trocknungsverlauf bei kapillar-porösen Gütern nach (Schwister & Leven, 2014)

In der Abbildung steht die weiße Kurve für die Trocknungsgeschwindigkeit. Für diese ist charakteristisch, dass nach einer Aufheizphase ein erster Trocknungsabschnitt beginnt, der mit konstanter Geschwindigkeit verläuft. Dieser erste Trocknungsabschnitt ist dadurch gekennzeichnet, dass das Wasser an der Paperoberfläche verdunstet. Wasser aus den Kapillaren wird an die Oberfläche nachtransportiert. Die Leistungsfähigkeit des Kapillartportes zur Oberfläche und die Menge des hier vorhandenen Wassers bestimmt die Trocknungsgeschwindigkeit. Sie ist deshalb in diesem Abschnitt konstant. Im zweiten Trocknungsabschnitt sinkt die Geschwindigkeit. Dabei wird Wasser aus dem Inneren der Kapillaren verdampft. Im dritten Trocknungsabschnitt verdampft das Wasser aus der Faserstruktur selbst. Hier sinkt die Trocknungsgeschwindigkeit weiter ab. Der Energiebedarf für die Trocknung errechnet sich aus der Aufheizphase und der Verdampfungsphase. Die zur Trocknung notwendige Wärmemenge berechnet sich aus folgenden Teilmengen:

- Wärmemenge zum Aufheizen des Papiers
- Wärmemenge zum Aufheizen des im Papier enthaltenen Wassers
- Verdampfungswärme des Wassers

Für die Berechnung der Wärmemenge Q , die zur Trocknung des Papiers notwendig ist, wird die Gleichung (4) verwendet. Sie lautet:

$$Q = (m_w c_w + m_p c_p) \Delta T + m_w h_w \quad (4)$$

Dabei bedeuten:

mMasse

cWärmekapazität

ΔTTemperaturdifferenz Siedepunkt zu Eingangstemperatur in die Trockenpartie

h massespezifische Verdampfungswärme

Indices:

pPapier

w....Wasser

Auf der Basis von Gleichung (4) wird die Berechnung des Einsparpotenzials vorgenommen, das sich erschließt, wenn der Trockengehalt des Papiers durch Nasspressen gesteigert werden kann.

2.2 Kurzer Abriß zum Stand der Technologie des Naßpressens für hohe Trockengehalte

Ein wesentlicher Fortschritt bei der Steigerung der Effizienz des Nasspressvorganges konnte durch die Einführung von Gleitflächenpressen (Schuhpressen) erzielt werden. Der Vorteil des Einsatzes dieser Pressenbauart besteht darin, dass die für die Entwässerung zur Verfügung stehenden Niplänge im Vergleich zu Walzenpressen um den Faktor von ca. acht ansteigt. Damit ist es möglich, den Pressimpuls zu steigern. Der Pressimpuls wiederum ist in guter Näherung der möglichen Trockengehaltssteigerung proportional. Ein weiterer Vorteil dieser Pressenbauart ist die Steigerung der Linienkraft bei gleichbleibenden oder sogar geringeren Pressdrücken. Damit kann das Volumen der Papierbahn geschont werden. Dieses ist insbesondere im Kartonbereich für die Erzielung hoher Biegesteifigkeiten sehr günstig. Deshalb begann der Siegeszug der Schuhpressen genau bei diesen Papierqualitäten. Später setzte er sich auch bei graphischen Papieren fort.

2.2.1 Bauarten und Pressenanordnungen

Die dominierende Bauart bei modernen Pressen Konstruktionen ist die Schuhpresse. Dabei höheren flächenbezogenen Massen größere Wassermengen durch den Nip transportiert werden müssen, findet man im Kartonbereich häufig auch Saugpressen. Daneben gibt es noch Pressen mit belüfteten Pressen Nip als Rillenpressen, Diagonalrillenpressen oder Pressen mit blindgebohrtem Mantel. Ältere Konstruktionen wie Vollmantelpressen oder Siebtuchpressen sind in modernen Maschinen nicht mehr anzutreffen. Hinsichtlich der erreichbaren Trockengehalte sind die Schuhpressen am leistungsfähigsten.

Pressen Anordnungen sollen derzeit möglichst kompakt sein, um umbauten Raum und Material einzusparen. Ein Beispiel dafür ist die in der nächsten **Abbildung 3** gezeigte Duo-Centri Presse. Ihr Einsatzgebiet reicht von Karton über Verpackungspapiere bis hin zu graphischen Papieren. In der abgebildeten Presse ist die Laufrichtung des Papiers von links nach rechts. Ebenso erfolgt die Zählung der Pressnips. Es ist möglich, den dritten Pressnip auch als Schuhpresse auszuführen.

**Duo-Centri II
with separate
4 th press**

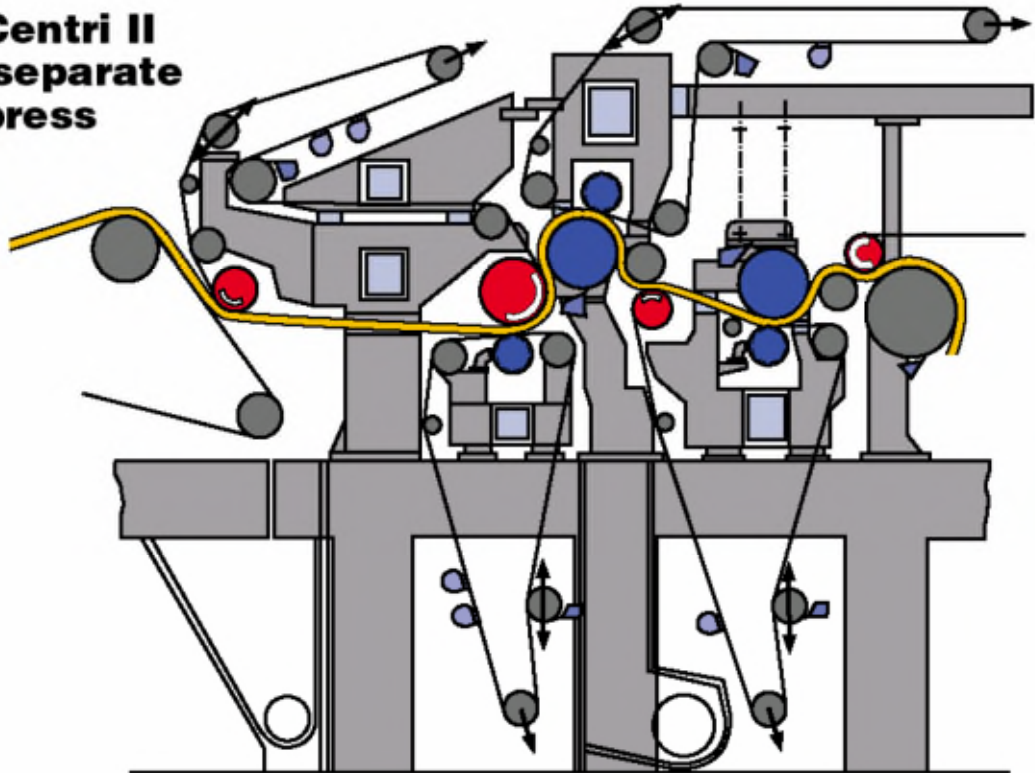


Abbildung 3: Duo-Centri II Presse (Quelle: Voith)

Die beste Entwässerungsleistung erreicht heute eine Anordnung zweier Schuhpressen. Die **Abbildung 4** zeigt eine sogenannte Tandem-Nipcoflexpresse. Eine derartige Anordnung ist eine Standardlösung sowohl für graphische Papiere als auch für Verpackungspapiere mit niedrigen Massen je Flächeneinheit. Sie erzielt derzeit die höchsten Trockengehaltssteigerungen in der Papierindustrie, wenn man von Sonderlösungen wie Presstrocknern oder Impulstrocknern, die Synergie-Effekte zwischen mechanischer und thermischer Entwässerung nutzen, einmal absieht.

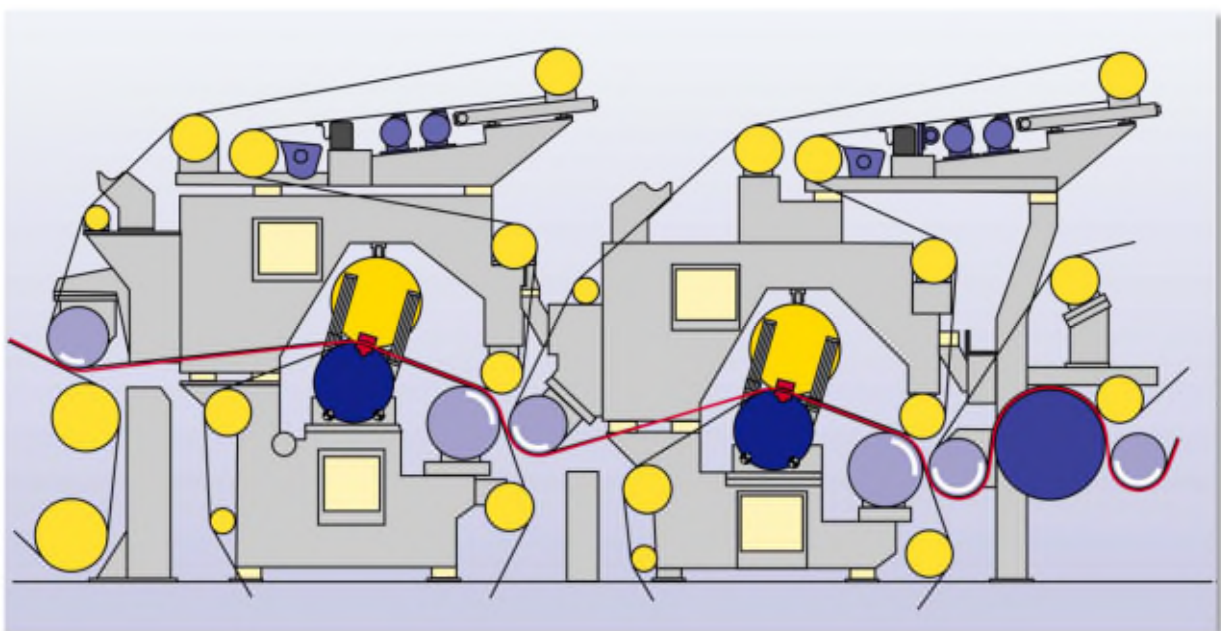


Abbildung 4: Tandem-Nipcoflexpresse (Quelle: Voith)

Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit von Schuhpressen ist es in bestimmten Fällen auch möglich, diese nur mit einem Nip auszulegen. Bezogen auf die **Abbildung 4** bedeutet das, dass eine der beiden Pressen Baugruppen entfallen könnte. Damit ergibt sich ein gewisses Einsparpotenzial hinsichtlich der Betriebskosten (Energie, Filze) und der Investitionskosten.

2.2.2 Prozeßparameter und erreichte Trockengehalte

In der **Abbildung 5** werden unterschiedliche Pressen Konzepte hinsichtlich der erzielbaren Press-Impulse bei variabler Geschwindigkeit dargestellt (linker Teil des Bildes). Im rechten Teil des Bildes ist der erzielbare Trockengehalt als Funktion des Pressimpulses gezeigt.

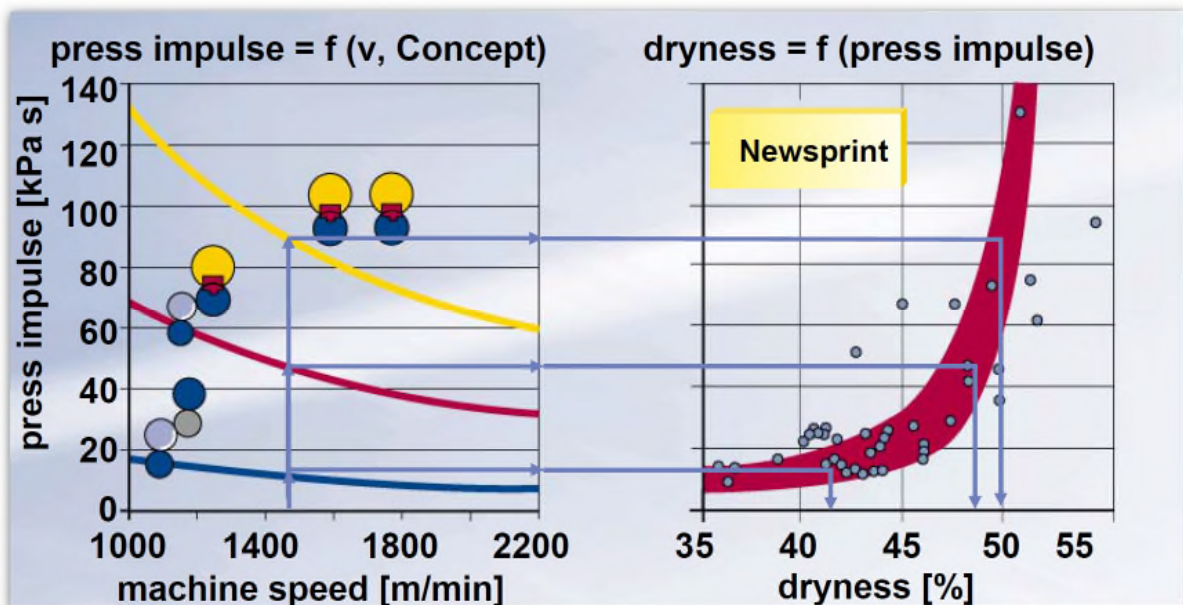


Abbildung 5: Erzielbare Trockengehalte als Funktion des Pressen Konzeptes und des Pressimpulses (Quelle: Voith)

Grade	Basis Weight [g/m ²]	Filler [%]	Speed [m/min]	Dryness [%]
Newsprint	45	15	1600	51 - 53
SC	56	30	1550	53 - 55
LWC	39	12	1300	50 - 52
Woodfree	80	18	1400	46 - 52

Abbildung 6: Maximale Trockengehalte in Abhängigkeit von der Papiersorte (Quelle: Voith)

Die **Abbildung 6** zeigt die maximal möglichen Trockengehalte bei der Anwendung von Schuhpressen im Bereich unterschiedlicher Papierqualitäten und Maschinengeschwindigkeiten. Für das vorliegende Projekt werden daher zur Beschreibung des Standes der Technik folgende Eckdaten zu Grunde gelegt und als Referenz verwendet:

- Pressimpuls in modernen Papiermaschinen zu 100 kPas angenommen.
- Maximaler Trockengehalt bei mechanischer Entwässerung 55 %.

2.3 Aufbau und Funktion des Voith-FiberXPress

Beim Voith-FiberXPress handelt es sich um ein Laborgerät, das als Pressensimulator im Vergleich zu Realisierungen von Pressen in Papiermaschinen extrem hohe Drücke und Verweilzeiten zu applizieren erlaubt. Die **Abbildung 7** zeigt einen Querschnitt durch das Gerät. Druckluft wirkt auf den Kolben im oberen Teil des Gerätes ein. Dieser Kolben hat einen vergleichsweise großen Querschnitt. Er ist starr gekoppelt mit dem Kolben in der Presskammer. Dieser hat lediglich einen Querschnitt von ca. 20 cm². Damit wird es möglich, ausgehend von Betriebsdrücken von ca. acht bar bei der Druckluftversorgung im Inneren der Presskammer Drücke bis zu zehn Megapascal zu erzeugen. Die Entwässerung erfolgt durch ein Sieb in der Bodenplatte (**Abbildung 9**) zentral durch eine Kapillare (im Allgemeinen eine Spritzenkanüle). Dadurch entstehen teilweise sehr lange Strömungskanäle in einem stark verdichteten Pad, die sicherstellen, dass keine Feinstoffe in das Filtrat gelangen. Feinstoffe können hypothetisch mehr Wasser binden, als normale Fasern. Ihr Verlust würde bedeuten, dass die Vorhersage des Grenz-trockengehaltes oder des Quellvermögens fehlerbehaftet wären. Das Gerät lässt sich um 180° kippen, so dass die Presskammer mit dem Prüfgut (i.d.R. Suspension mit 4% Stoffdichte) von oben befüllt werden kann. Nach dem Aufschrauben des Verschlusses kippt man das Gerät wiederum um 180° in die Messposition zurück. Der Messvorgang wird komplett über den angeschlossenen Computer gesteuert und ausgewertet.

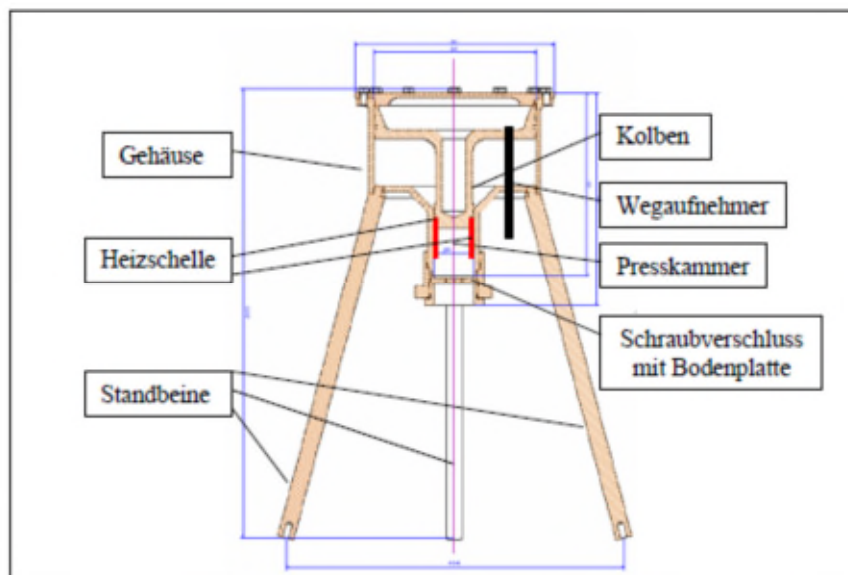


Abbildung 7: Schnittdarstellung FiberXPress, Quelle: (Wendt C. , 2007)

Die **Abbildung 8** zeigt den Versuchsaufbau in Kombination mit einer Mikrowellenwaage zur Trockenmassebestimmung der ausgeworfenen Pads.

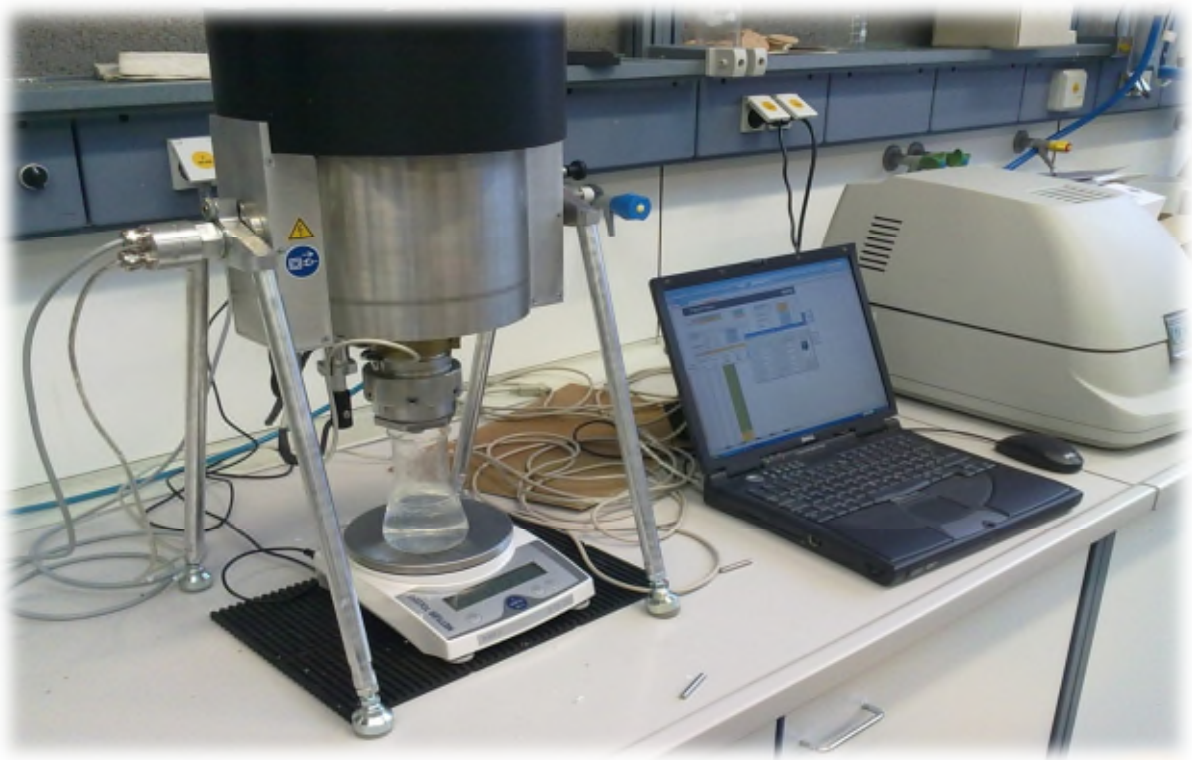


Abbildung 8: Versuchsaufbau FiberXPress mit Mikrowellenwaage zur Pellettrocknung



Abbildung 9: Details der Siebkammer und der Presskammer mit Heizmanschette

In **Abbildung 9**, rechter Teil, ist die Presskammer mit angeschraubtem Verschluss zu sehen. Im oberen Teil befindet sich eine Heizmanschette, mit deren Hilfe sich Temperaturen $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$ einstellen lassen. Dadurch ist es möglich, Synergieeffekte zwischen mechanischer und thermischer Entwässerung dahingehend zu generieren, als durch erhöhte Temperatur die Viskosität des Wassers sich verringert und nach Gleichung (2) die entfernte Wassermenge pro Zeit ansteigt.

FiberXPress						VOITH					
Datum		01.10.2014 12:30		Control panel		Rohstoffdaten					
Rohstoff		ZH 11		xls-formula		Rohstoff	Temperatur	23,0	°C		
				xls-input			Stoffdichte	4,00	%		
						Grammatur	Soll	4000	g/m²		
							Ist	4069	g/m²		
						Füllmenge	Soll	196,35	g		
							Ist	196,63	g		
						Pellet	feucht	11,61	g		
							otro	7,99	g		
							TG	68,82	%		
						Leckage		0,34	g		
						2105,567					
Bemerkung											
letzte Messung	Intervall	Zeit	Druck (Soll)	Druck (Ist)	Press- impuls	Masse Wasser	Trocken gehalt	Dicke	Dicke aus TG	Kom- pression	
	Nr	[s]	[MPa]	[MPa]	[MPas]	[g]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	
	0	0.0	0.00	0.51	0.00	157.31	20.50%	17.78	17.78	0.00	

und Erwärmungszyklus an einer kleinen Faserstoffprobe (4 mg) können die 3 Wasserfraktionen im Faserstoff aufgrund ihres spezifischen Schmelzpunktes getrennt ausgewiesen werden (vgl. auch Abschnitt 3.5.3).

Der Messbereich des DSC-Verfahrens liegt zwischen -70 und 600 °C. Die Messdauer beträgt ca. 1 h je Analyse, d.h. für eine Doppelbestimmung inkl. Vorbereitung und Auswertung liegt der Zeitaufwand bei 3h. Unter Temperatureinfluss zersetzliche Proben können nicht analysiert werden.

2.5 Theoretische Grundlagen zur Bewertung der Fasermorphologie

Das Fiberlab 5.0 (Fa. Metso) bestimmt unterschiedliche geometrische Parameter zur Morphologie der Cellulosefasern in einer stark verdünnten Fasersuspension. Gemessen werden u.a.

- Faserkonturlänge, Faserlängenverteilung L_p ($l < 200 \mu\text{m}$ ist Feinstoff) **(1)**
- projizierte Faserlänge L_c **(2)**
- daraus berechnet: Faserform Curl Index = $((L_c / L_p) - 1) * 100 \%$ **(3)**
- Faserdurchmesser **(4)**
- Faserwandstärke **(5)**
- Knickindex **(6)**
- Fibrillierungsindex **(7)**

Bei jeder Messung werden bis zu 20.000 Einzelfasern bzw. Partikel vermessen, bei einer Auflösung von $10 \mu\text{m}$ in Faserlängsrichtung und $1 \mu\text{m}$ in Richtung Faserquerschnitt. Die Reproduzierbarkeit der Methode liegt bei

- Faserlänge: $< 1.5 \%$
- Faserdicke: $< 2.0 \%$
- Faserwandstärke: 2.6%

Die folgenden **Abbildungen** verdeutlichen die wesentlichen Zusammenhänge bei der Erfassung einzelner Faserparameter. Die Nummerierung entspricht der Reihenfolge in der Aufzählung oben in diesem Abschnitt:

- 1, 2 und 3:

Die Faserkonturlänge L_c verkörpert die tatsächliche Faserlänge unter Berücksichtigung sämtlicher Abweichungen von der ideal linear gestreckten Faserform. Die projizierte Faserlänge L_p ist deutlich geringer und stellt den Abstand zwischen den beiden Faserendpunkten dar. Der Curlindex quantifiziert die Abweichung der Faserform vom ideal gestreckten Zustand, also inkl. aller vorhandenen Knicke und Biegungen.

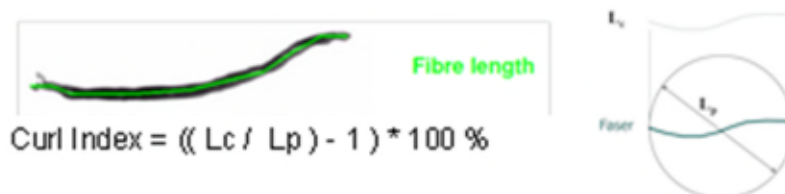
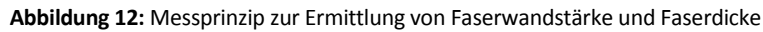


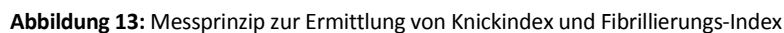
Abbildung 11: Messprinzip zur Ermittlung von Faserlänge und Curl-Index

- 4 und 5:

Der Faserdurchmesser w und die Faserwandstärke werden über Graustufendifferenzen im aufgezeichneten Graustufenbild differenziert. Dabei unterscheidet man 3 Graustufenlevel: hoher Grauwert = Faserwand, mittlerer Grauwert = Faserlumen und niedrigster Grauwert = umgebende Wasserphase.



- Der Knickindex der Faser ergibt sich über die Aufsummierung der Anzahl und bezüglich Knickwinkel unterschiedliche Wichtung bezogen auf die aufsummierte Faserlänge. Beim Fibrillierungsindex wird die Fläche der noch am Faserkorpus anhaftenden dünnen Fibrillenstränge zur Gesamtfaserfläche ins Verhältnis gesetzt.



Die ausgewählten Faserstoffe sollten möglichst praxisrelevant sein. Aus diesem Grund entschied man sich für einen Wellenstoff (Fluting) auf der Basis von OCC als Repräsentanten für Verpackungspapiere, eine Mischung aus 50% Zeitungen aus DIP und 50% Zeitschriften auf LWC-Basis als Repräsentanten für grafische Papiere. TMP gilt als Repräsentant für das strukturdruk begrenzte Pressen. Ein ungebleichter Kiefern-/Fichtensulfatzellstoff wurde überwiegend fibrillierend gemahlen. Die Proben entstammen einem Mahlregime mit gestaffeltem massespezifischem Mahlarbeitsbedarf. Sie stehen als Repräsentant für das durchflußbegrenzte Pressen. Durch diese Auswahl sollte trotz der Limits hinsichtlich Zeit und Budget ein aussagefähiges Spektrum erfasst werden. Einen Überblick über die untersuchten Proben und ihre Bezeichnungen vermittelt die nachfolgende **Abbildung 14**.

Bezeichnung	Details
X	OCC-Faserstoff Jass
	abgesaugter Filterkuchen
	Standard-RK-Prüfblatt
	FIBER-EXPRESS-Pellets feucht 2.500 g/m ²
	FIBER-EXPRESS-Pellets getrocknet 100, 200, 1.000, 2.000, 4.000 g/m ²
Z + Z	Modellstoff 50 % Zeitungen + 50 % Zeitschriften, FH München
	abgesaugter Filterkuchen
	Standard-RK-Prüfblatt
	FIBER-EXPRESS-Pellets feucht 2.500 g/m ²
	FIBER-EXPRESS-Pellets getrocknet 100, 200, 1.000, 2.000, 4.000 g/m ²
TMP	Holzstoff, FH München
	abgesaugter Filterkuchen
	Standard-RK-Prüfblatt
	FIBER-EXPRESS-Pellets feucht 2.500 g/m ²
Monopol E	FIBER-EXPRESS-Pellets getrocknet 1.000, 2.000, 4.000 g/m ²
	Zellstoff ungebleicht, Mahlenergie 0; 20; 40; 80; 120; 160 kWh/t
	abgesaugter Filterkuchen
	Standard-RK-Prüfblatt
	FIBER-EXPRESS-Pellets feucht 2.500 g/m ²
extra-Proben Jass (OCC- Faserstoff)	FIBER-EXPRESS-Pellets getrocknet 1.000, 2.000, 4.000 g/m ²
	nach Presse
	nach Vortrockenpartie
	Fertigpapier

Abbildung 14: Gesamtüberblick der untersuchten Proben

3.2 Überblick über die Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Ermittlung des maximalen Trockengehalts (HM)

Es waren die Druck-Zeit Profile für jedes Substrat zu ermitteln, die bei einer möglichst schonenden Entwässerung der Substrate zu einem maximalen Trockengehalt führen. Referenz war dabei die Methode der HM für die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mit Hilfe des Pressensimulators.

Zu variieren waren die Bedingungen der Vorentwässerung für einen Trockengehalt von 20%, der als Endwert für die Entwässerung durch eine Blattbildungseinheit angesehen werden kann und diese simulieren sollte. Danach erfolgte eine intensivere Entwässerung auf den maximalen Trockengehalt mit einer geeigneten Druckverteilungskurve.

Arbeitspaket 2: Bereitstellung der Pellets (HM)

Um Veränderungen der Fasereigenschaften und des Verhaltens der Substrate im Recycling beschreiben zu können, wurden Pellets nach dem als optimal erkannten Pressregime hergestellt. Dieses Arbeitspaket war sehr zeitintensiv, da pro Pressvorgang lediglich 4 g otro Pelletmasse erzeugt werden können. Die Pellets der vier untersuchten Faserstoffe und die unverpressten Faserstoffe wurden der Papiertechnischen Stiftung für die Recyclinguntersuchungen zur Verfügung gestellt.

Arbeitspaket 3: Identifizierung der Veränderungen am Faserstoff (PTS)

Basis für den Vergleich waren die jeweils unverpressten Substrate. Die bereitgestellten Pellets waren hinsichtlich der Veränderungen der Fasereigenschaften zu untersuchen. Dabei sollten mit bildgebenden Verfahren Veränderungen des Faserquerschnitts und der inneren Oberfläche nachgewiesen werden. Die innere Oberfläche ist für die Quellung bei erneuter Befeuchtung wichtig. Die Pellets wurden mit geeigneten Mitteln rückbefeuchtet und die Veränderung des Wasserrückhaltevermögens wurde dokumentiert. Die Veränderung des WRV gibt Hinweise darauf, wie sich die intensiv entwässerten Faserstoffe im Recycling verhalten würden. Je größer die Unterschiede zum unverpressten Substrat ausfallen, desto geringer wäre der Wert des Faserstoffes für das Recycling (Abnahme der Festigkeitskennwerte).

Arbeitspaket 4: Recyclingversuche (PTS)

Von unverpressten und verpressten Substraten waren unter standardisierten Bedingungen je vier Blattbildungszyklen im Labor durchzuführen. Dabei waren die für das Recycling typischen Veränderungen der Faserlänge, des Entwässerungswiderstands, des Quellvermögens und der Festigkeitseigenschaften zu dokumentieren. Im anschließenden Vergleich zwischen den verpressten und unverpressten Substraten sollte abgeschätzt werden, wie groß der Einfluss eines intensivierten Naßpressvorganges auf das Faserstoffpotential ist.

3.3 Allgemeine papierphysikalische Prüfungen

Um die Einordnung der verwendeten Substrate im Vergleich zu anderen, bekannten, zu erleichtern, wurden zunächst ausgewählte Eigenschaftskennwerte ermittelt.

3.3.1 SR-Wert und WRV

Der Entwässerungswiderstand nach Schopper-Riegler (SR-Wert) wurde nach ISO 5267-1:1999 ermittelt.

Die Messung des Wasserrückhaltevermögens (WRV) erfolgte nach ISO 23714. Dabei wird die Relativmasse des bei einer Zentrifugalbeschleunigung von 3000 g nicht entfernbaren Wassers als Maß für Quellvermögen (innere und äußere Oberfläche) von Faserstoffen ermittelt.

Bisher wird der WRV-Wert als Grenzwert für das nicht mehr mechanisch abtrennbare Wasser in Papier-Faserstoffen angesehen.

$$\text{WRV (ISO)} = m_{\text{wasser}} / m_{\text{trocken}} \text{ [g/g]}$$

$$\text{WRV relativ} = m_{\text{Wasser}} * 100 / m_{\text{trocken}} = (m_{\text{feucht}} - m_{\text{trocken}}) * 100 / m_{\text{trocken}} \text{ [%]}$$

Für die ausführlichen Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Press- und Trocknungsvarianten wurden die Proben teilweise spezifisch weiter aufbereitet.

3.3.2 Dicke und Rohdichte

Die Messung der Dicke der Prüflätter erfolgte gemäß DIN EN ISO 534:2005, die Bestimmung der flächenbezogenen Masse nach DIN EN ISO 536:1995. Die Rohdichte berechnet sich dann zu:

$$\rho = \frac{m_A}{1000 \cdot d} \quad (5)$$

Dabei bedeuten

P.... Dichte in g/cm^3

m_AFlächenbezogene Masse in g/m^2

d.... Dicke in mm.

3.3.3 Zugfestigkeit

Der Bestimmung der Zugfestigkeit lag die Norm ISO 1924-2:1994 zugrunde. Die Dehnungsgeschwindigkeit (Traversengeschwindigkeit) lag bei 10 mm/min.

3.4 Trocknung der Pellets

Die Trocknung der Pellets bzw. die dafür notwendige Zeit bestimmt wesentlich die Rationalität der Abläufe der Analyse mit Hilfe des FiberXPress. Je kürzer die Trockendauer, desto effizienter die Arbeitsabläufe. In einem ersten Ansatz kam eine Mikrowellenwaage der Firma CEM zum Einsatz. Es war schnell evident, dass für die Pellettrocknung ein eigenständiger Algorithmus (Programm) zu entwickeln war. Dieser Algorithmus nach der Methode Versuch und Irrtum entwickelt, funktionierte im Mittel auch gut. Allerdings traten bei einer von ca. zehn Proben des gleichen Substrates bei gleichem Feuchtegehalt und gleicher Masse Verbrennungen auf, deren Ursache nicht geklärt und demzufolge auch nicht beseitigt werden konnte. Aus diesem Grunde entschieden wir uns, die Trocknung mit Hilfe des sogenannten Schnelltrockners der Fa. Lorenzen & Wettre („Waffeleisen“) bis zur Massekonstanz durchzuführen. Die Trocknung für die Recyclingversuche erfolgte in einem Trockenschrank bei $105\text{ °C} \pm 3\text{ K}$, um eine zu starke Verhornung auszuschließen. Dergleichen Rücksichtnahme war bei den sonstigen Untersuchungen mit dem FiberXPress nicht erforderlich, da die Pellets nur zur Messung des Trockengehalts und der Dicke benötigt und danach verworfen wurden.

3.5 Bewertung der Recyclingfähigkeit

Zur Überprüfung des gegebenenfalls veränderten Recyclingverhaltens einer mit hoher Druckintensität gepressten Probe wurde das Muster Z+Z (50 % Zeitungen + 50 % Zeitschriften) ausgewählt. Die folgenden Proben wurden verglichen:

- Zeitungen + Zeitschriften in Originalform (Partikel $2 \times 2\text{ cm}$)
- Zeitungen + Zeitschriften als nassgepresstes und getrocknetes Pellet (Pellets wurden nach der Pressung bei 105 °C für 24h im Trockenschrank getrocknet)

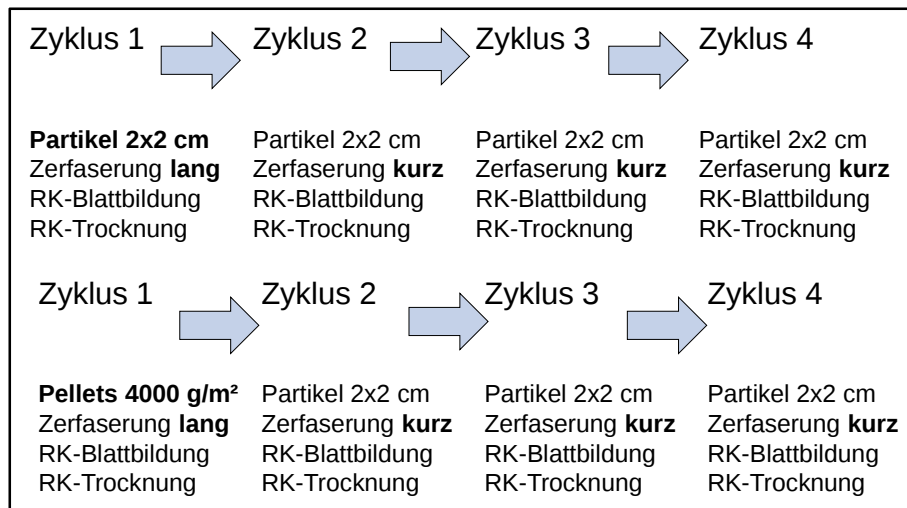


Abbildung 15: Überblick der Zerfaserungs- und Blattbildungszyklen in den Recyclingversuchen

Beide Proben wurden einem 4maligen Recyclingzyklus im Labor unterzogen. Die folgende Zerfaserungsprozedur wurde angewendet:

- Zyklus 1:

Einweichen über Nacht bei 60 °C, zerfasern der Pellets von Hand, nochmaliges Einweichen für 4 h bei 60 °C, Zerfaserung im Standard-Desintegrator 40+45 min bei 3000 U/min

- Zyklus 2-4:

Zerfaserung im Standard-Desintegrator 15 min bei 3000 U/min

Nach dem 1. und 4. Recyclingzyklus wurden die folgenden Stoff und Festigkeitsparameter bestimmt:

- Entwässerungswiderstand
- WRV
- Fasermorphologie FIBERLAB
- Aschegehalt
- Tensile-Index
- Tear-Index

3.5.1 DMA-Verfahren

Im Projekt sollte versucht werden, an den zum Pellet gepressten Proben charakteristische Papierfestigkeitsparameter wie das E-Modul zu messen. Aus dem E-Modul können auch Rückschlüsse auf den Tensile-Index gezogen werden. Aufgrund der Probenabmessung ist die herkömmliche Bestimmung des Tensile-Index aufgrund zu großer Einspannlängen nicht möglich.

Die speziell für diese Versuche erzeugten Pellets mit einer Flächenmasse von 100 und 200 g/m² waren leider aufgrund zu großer Inhomogenitäten nicht für die DMA-Messungen geeignet. Auch war die

Dichte der 100 und 200 g/m² Pellets deutlich geringer als bei den Pellets ab 1.000 g/m². Der Fiber-Express ist für die Erzeugung leichtgewichtiger Presslinge anscheinend nur bedingt geeignet. Von der Fa. Voith als Hersteller des Simulators waren solche flächenbezogenen Massen auch nie vorgesehen und durch die Software zur Steuerung des Gerätes wirksam verhindert. An der HM wurde die Software dahingehend modifiziert, dass von Seiten der Steuerung des Gerätes diese Flächenmassen realisiert werden konnten, allerdings mit den geschilderten Mängeln einer definierten Formierung der Pads.

3.5.2 Fasermorphologie

Die Fasermorphologie wurde mit Hilfe des Fiberlab 5.0 der Fa. Metso anhand der in Abschnitt 2.5 beschriebenen Kennwerte ermittelt.

3.5.3. Differenzialkalorimetrie (DSC-Verfahren)

Die Detailuntersuchung der Wasserfraktionen vor und nach dem Pressvorgang oder einer Trocknung ermöglicht differenzierte Rückschlüsse zum Entwässerungsverhalten bzw. zum Rückbefeuchtungsverhalten der Faserstoffproben.

Die im Faserstoffvlies (Filterkuchen, Papierblatt, gepresstes Pellet) enthaltenen Wasserfraktionen können dazu bezüglich ihrer unterschiedlichen Charakteristika wie folgt definiert werden:

- **fw (freezing water)**

Diese Wasserfraktion befindet sich hauptsächlich im Lumen, in den Faserzwischenräumen und in den Makroporen der Faserwand. Makroporen. Es hat das gleiche Schmelzverhalten wie reines Wasser, d.h. der Gefrierpunkt liegt bei 0 °C. Diese Wasserfraktion ist auf mechanischem Wege leicht aus der Faserstoffvlies entfernenbar.

- **fbw (freezing bound water)**

Die fbw-Wasserfraktion befindet sich hauptsächlich in den kleinen Poren der Faserwand und wird durch die sogenannte Kapillarkondensation aufgenommen. Dieses Wasser unterliegt einer Schmelzpunktniedrigung, d.h. es gefriert je nach Porenweite erst bei Temperaturen bis zu -10 °C. Diese Wasserfraktion ist auf mechanischem Wege deutlich schwerer entfernenbar als die FW-Wasserfraktion. Die Porosität der Faserwand ergibt sich über Abstände in der Strukturanordnung der Fibrillenstränge in der freigelegten S2-Wand der Cellulosefasern (siehe Abb. 16).

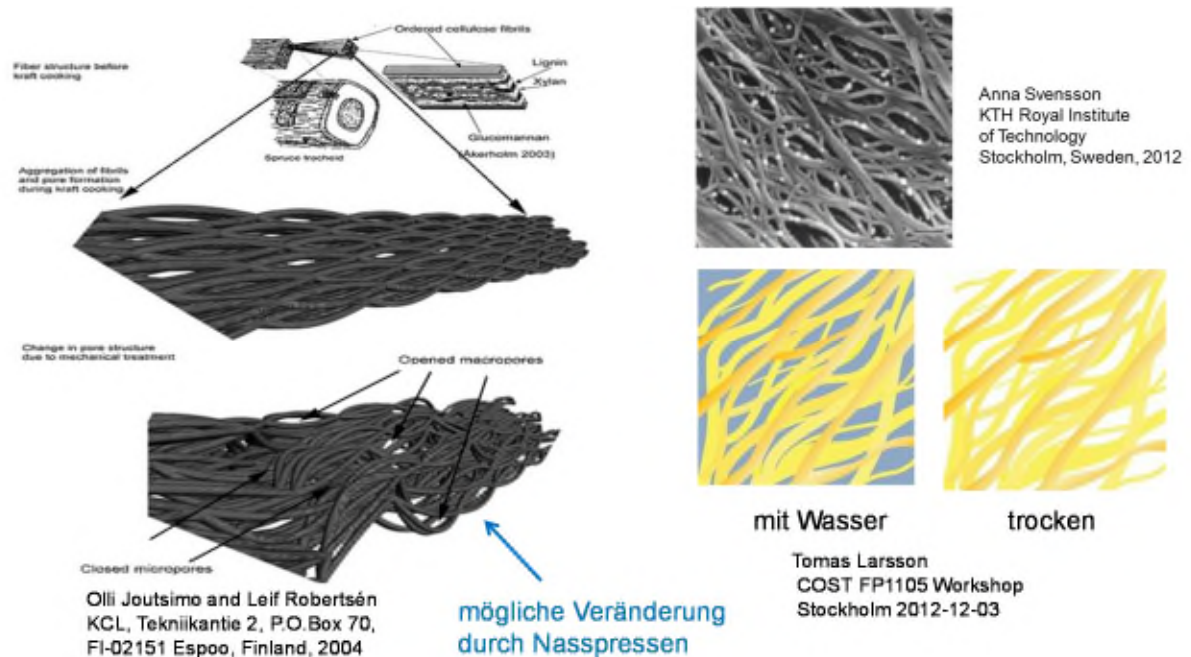


Abbildung 16: Visualisierung der Porenstruktur der Faserwand

Die Bestimmung der Porengrößenverteilung (PGV) in der Faserwand kann in Anlehnung an MALONEY et al. [i] durchgeführt werden. Zu Grunde liegt hier die GIBBS-THOMSON-Beziehung. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Gefrierpunktniedrigung ΔT und dem Porendurchmesser D .

$$\Delta T = T_{m, \text{Wasser}} - T_m = \frac{-4 \cdot T_{m, \text{H}_2\text{O}} \cdot \gamma_{\text{Is}} \cdot \cos \theta}{D \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot H_{m, \text{H}_2\text{O}}}$$

ΔT Schmelzpunktniedrigung
 $T_{m, \text{Wasser}}$ Schmelzpunkt des Wassers
 γ_{Is} Grenzflächenenergie Eis-Wasser
 θ Randwinkel Wasser-Faser
 $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ Dichte des Wassers
 $H_{m, \text{H}_2\text{O}}$ Schmelzwärme des Wassers

Sie ist gültig unter der Annahme zylindrischer Poren und der Unlöslichkeit von Cellulose in Wasser. D und T_m (bzw. ΔT) sind die einzigen Unbekannten, nach dem Einsetzen der Bekannten ergibt sich:

$$D = \frac{39,58}{\Delta T} \quad \text{nach [ii] bzw.} \quad D = \frac{40,3}{\Delta T} \quad \text{nach [i].}$$

Im Rahmen dieser Methode wird mit der Gleichung nach [ii] gearbeitet, es ergibt sich folgende Zuordnung zwischen Gefrierpunktniedrigung und Porendurchmesser:

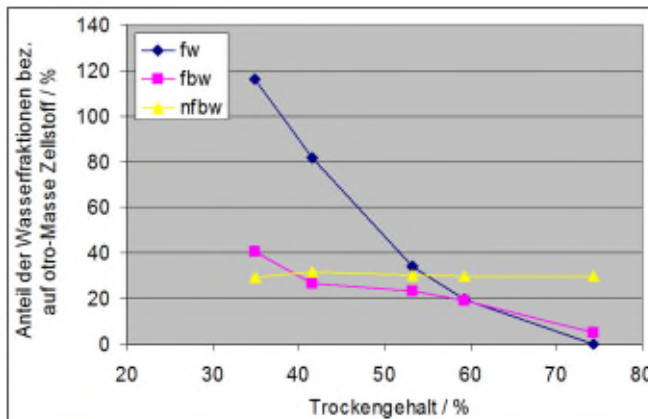
Schmelzpunkt [°C]	-9	-6	-3	-1,5	-0,8	-0,5	-0,2	-0,1
Porendurchmesser [nm]	4	7	13	26	49	79	198	396

Abbildung 17: Zusammenhang zwischen Schmelzpunkt des Wassers und Porendurchmesser bei der DSC-Messung

Durch das stufenweise Auftauen einer gefrorenen Probe von feuchtem Zellstoff wird die bei der jeweiligen Temperatur benötigte Schmelzwärme ermittelt und über die spezifische Schmelzwärme des Wassers auf die Wassermasse rückgerechnet. Die Messung wurde mit einer DSC1 der Fa. Mettler Toledo durchgeführt.

- **nfbw (non freezing bound water)**

Das auch bei Temperaturen von deutlich unter 0 °C nicht gefrierende Wasser ist als ca. 1 nm dicke Schicht an den Innenflächen der Kapillaren der Faserwand bzw. direkt an die Celluloseoberfläche gebunden. Es ist eine sehr starke Bindung an die freien Hydroxylgruppen vorhanden. Dieses nicht gefrierende Wasser kann auch mechanisch nicht mehr aus dem Faserstoffvlies entfernt werden. Erst bei der thermischen Trocknung des Faservlieses wird auch diese Wasserfraktion signifikant reduziert.



Der Anteil der drei unterschiedlichen Wasserfraktionen ist in Abb. 18 an einem Beispielzellstoff dargestellt. Man sieht die signifikante Reduzierung des fw-Wassers während das nicht gefrierende Wasser bei allen über eine mechanische Entwässerung erreichten Endtrockengehalten unverändert blieb.

Abbildung 18:
Anteil der Wasserfraktionen im Faserstoff

3.5.4 Weitere von der PTS verwendete Prüfmethoden

Weitere im Projekt angewandte Messmethoden waren :

- | | |
|-------------------------------|------------------------|
| • Entwässerungsverhalten E-SR | DIN ISO 5267-1 |
| • Aschegehalt | DIN38409 |
| • Blattdicke und Grammatur | DIN EN ISO 536:1996 |
| • Tensile-Index | DIN EN ISO 1924-2:2009 |
| • Tear-Index | DIN EN 21974 |

Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskop

4 Ergebnisse

4.1 Bewertung der Eigenschaftskennwerte der Substrate

Die Zerfaserung der Mischung aus Zeitungen und Zeitschriften, Wellpappenroh papier und TMP erfolgte im ZELLCHEMING-Standarddesintegrator bei 4% Stoffdichte, einem Volumen von 2 dm³. Für Zeitungen und Zeitschriften und TMP ließ sich die Stippenfreiheit nach 10 Minuten Zerfaserungszeit erreichen, bei Wellpappenroh papier erst nach 30 Minuten. Der Zellstoff Monopol E (ungebleichter Kiefern-Fichten-Sulfatzellstoff) durchlief eine Vorquelldauer von ca. 24 Stunden. Die Zerfaserung und Mahlung wurde mit Hilfe des Versuchstandes Stoffaufbereitung der HM vorgenommen. Es ergaben sich folgende Kennwerte für den Entwässerungswiderstand:

	Fluting	Z+Z	TMP
SR-Wert in SR	52	55	68

Abbildung 19: SR-Werte der Ausgangsfaserstoffe

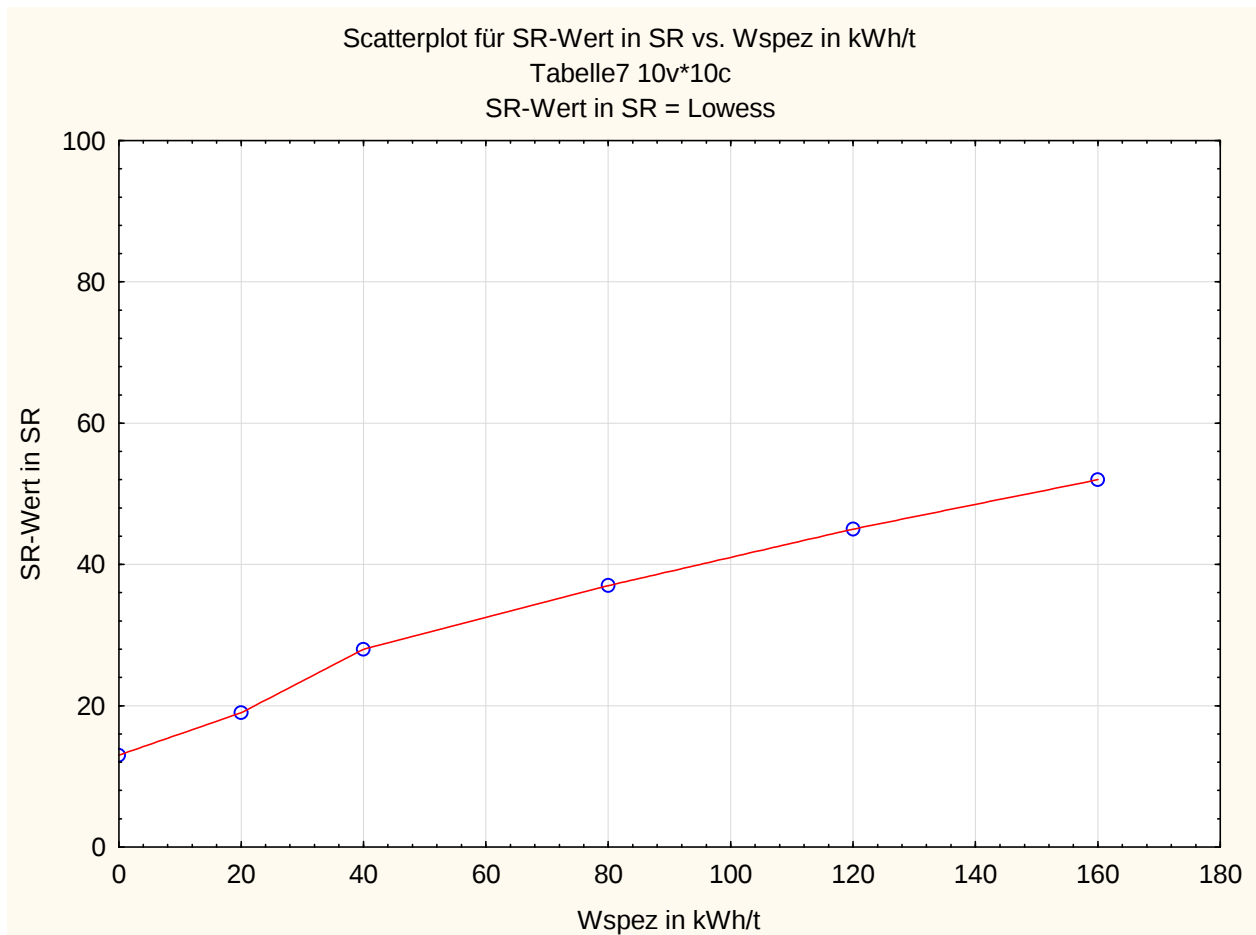


Abbildung 20: Zellstoffmahlreihe, Entwicklung des Entwässerungswiderstandes

Der ungebleichte Sulfatzellstoff erfuh eine überwiegend fibrillierende Mahlbehandlung. Auf diesem Wege sollten besonders viele neue Oberflächen geschaffen werden, die aufgrund der Wechselwirkung der Wasserdipole mit den Hydroxylgruppen der Cellulose viel Wasser binden können. Dabei steigt der SR-Wert nur relativ moderat an.

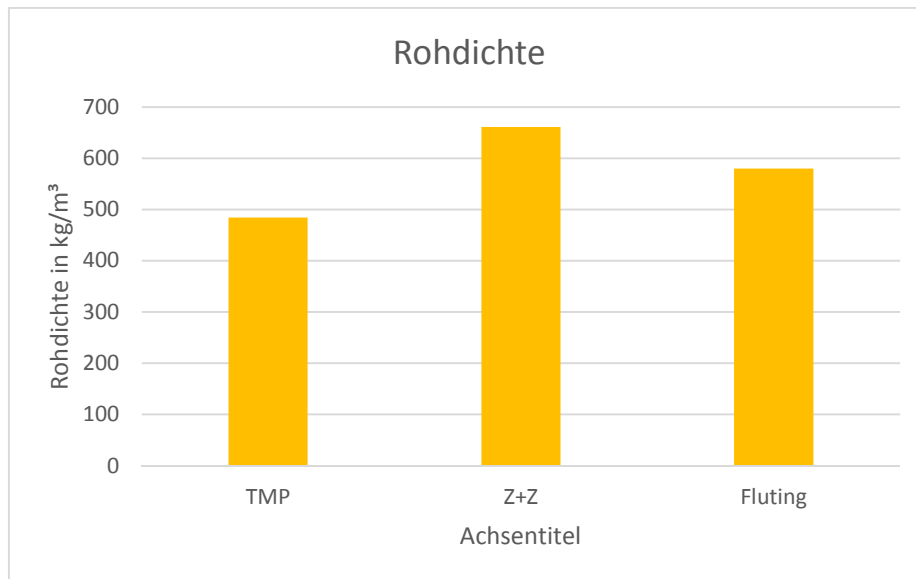


Abbildung 21: Rohdichte der Substrate

Abbildung 21 zeigt die Rohdichte der Substrate. Zeitungen und Zeitschriften erreichen hier aufgrund des zu erwartenden vergleichsweise hohen Gehalts an Füllstoff bzw. Streichpigmenten den höchsten Wert.

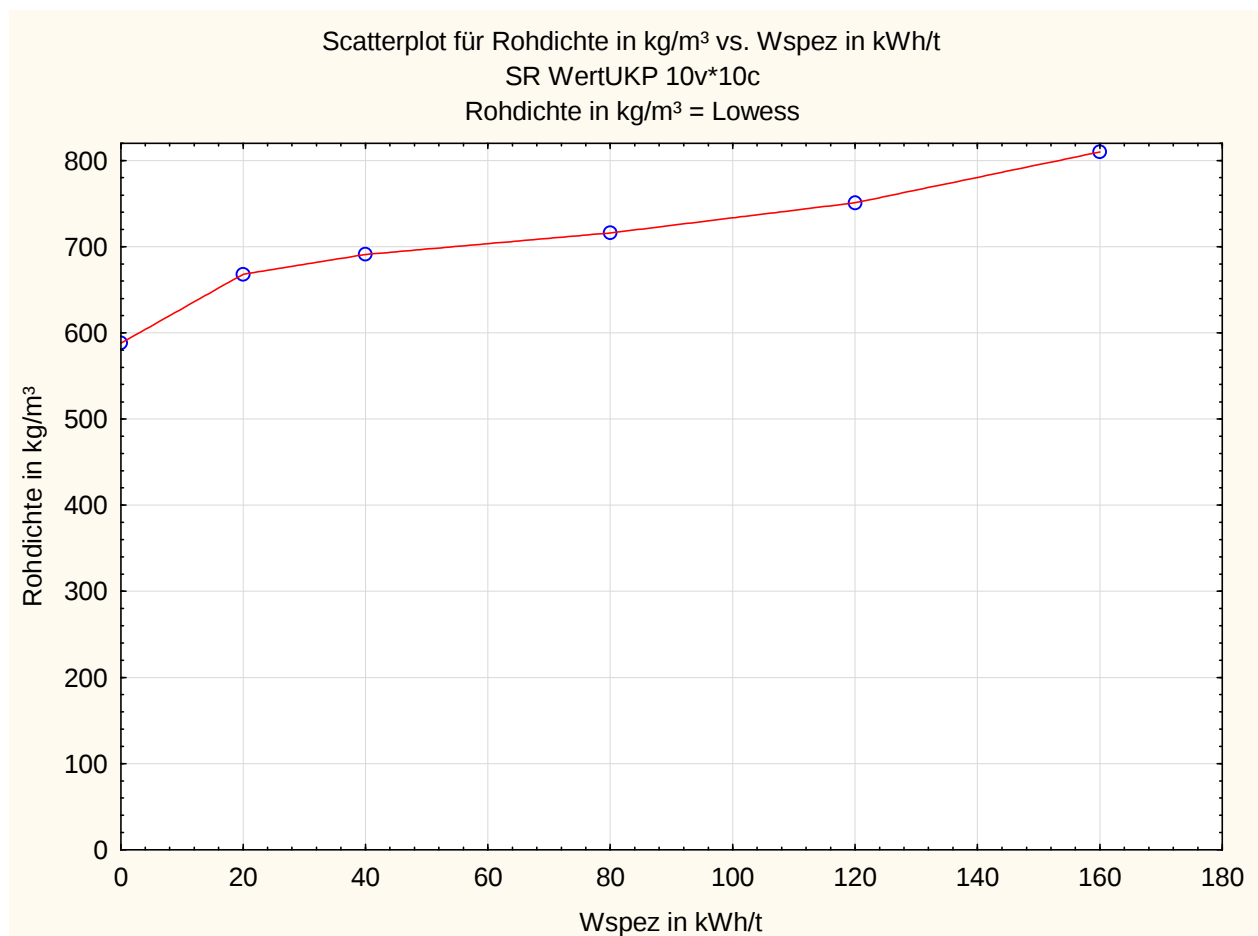


Abbildung 22: Anstieg der Rohdichte bei der Zellstoffmahlung

Durch die Mahlung steigt die Rohdichte des Zellstoffes in der erwarteten Größenordnung an. Ursache ist die externe und interne Fibrillierung, die zu einer höheren Faserflexibilität führt und eine dichtere

Packung bei der Blattbildung und Trocknung bewirkt. Auch ohne die Anwesenheit von spezifisch schwererem Material, wie Füll- und Feinstoffen, wird so die Dichte der Mischung aus Zeitungen und Zeitschriften übertroffen.

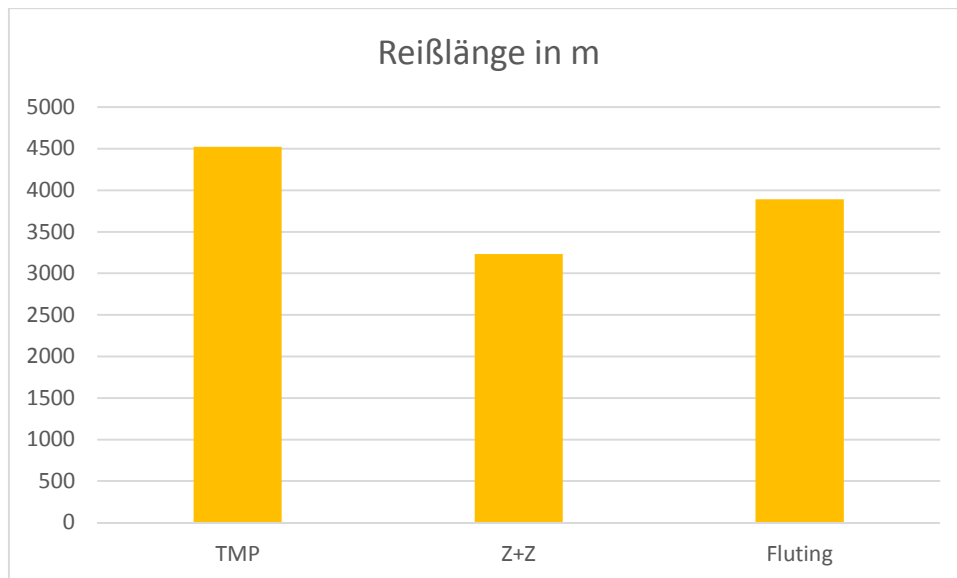


Abbildung 23: Reißlänge der Substrate

Wie die **Abbildungen 21** und **22** zeigen, unterscheidet sich die Rohdichte der einzelnen Faserstoffe bzw. entwickelt sich infolge Mahlung deutlich. Damit ändert sich bei vergleichbarer flächenbezogener Masse die Dicke der Proben und damit auch ihre Querschnittsfläche. Die Vergleichbarkeit über die laut Standard anzugebende Bruchspannung ist somit nicht befriedigend gegeben. Aus Verständnisgründen wird daher bei der Darstellung der Zugfestigkeit hier auf die Reißlänge zurückgegriffen, die eingeführt und geläufig ist. Im Vergleich zu den Altpapierstoffen zeigt der TMP hier und auch in den nachfolgenden Darstellungen der Brucharbeit und des Tear-Index (**Abbildungen 25** und **27**) erstaunlich hohe Werte. Leider liegen uns keine Erzeugungsbedingungen (Temperatur, massebezogener Arbeitsbedarf) für den TMP vor. Der SR-Wert deutet jedoch an, dass der Faserstoff in Richtung splitterfreier Druckpapierqualität entwickelt worden ist. Der Zellstoff lässt sich durch die relativ schonende Mahlung zu deutlich höheren statischen Festigkeiten entwickeln. Sie sind im Maximum etwa doppelt so hoch, wie bei den Altpapierstoffen und dem TMP (**Abbildung 24**) und erreichen 8000 m Reißlänge. Eine sehr wichtige Aussage zur Qualität des Papiergefüges liefert auch die Brucharbeit oder das Arbeitsvermögen des Blattes, das durch sie beschrieben wird. Es ist insbesondere vor dem Hintergrund von Belastungen, die im Rahmen der Papierverarbeitung möglicherweise wirken können, wichtig hier hohe Kennwerte zu erreichen. Dies schafft komfortable Reserven für die umformenden Prozesse der Papierverarbeitung.

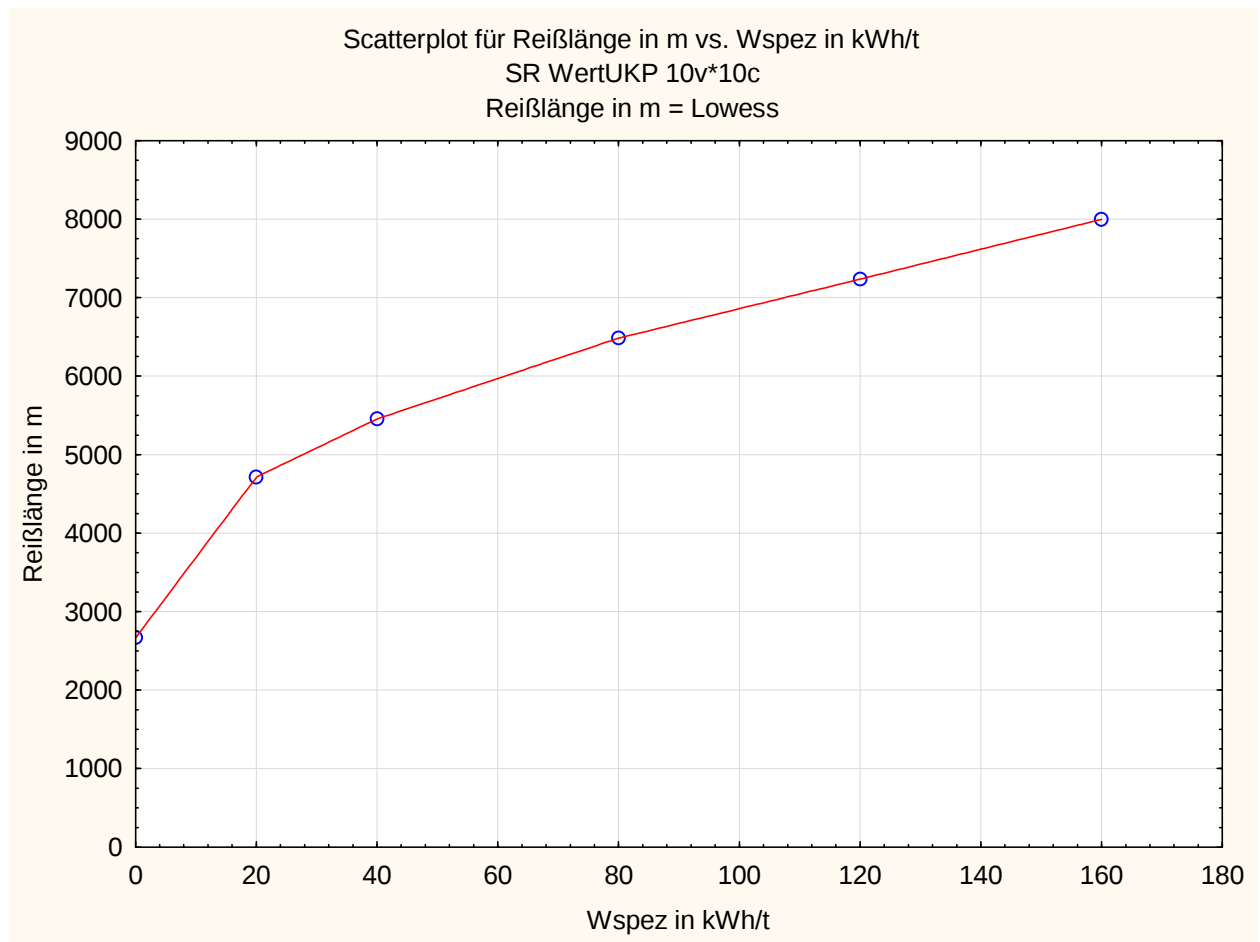


Abbildung 24: Entwicklung der Zugfestigkeit infolge Mahlung des Zellstoffes

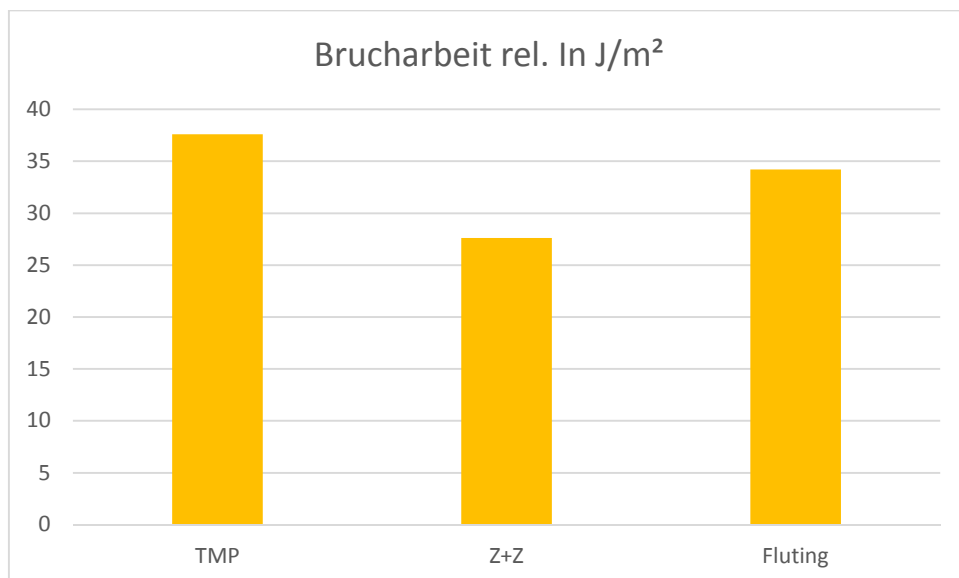


Abbildung 25: Brucharbeit der Substrate

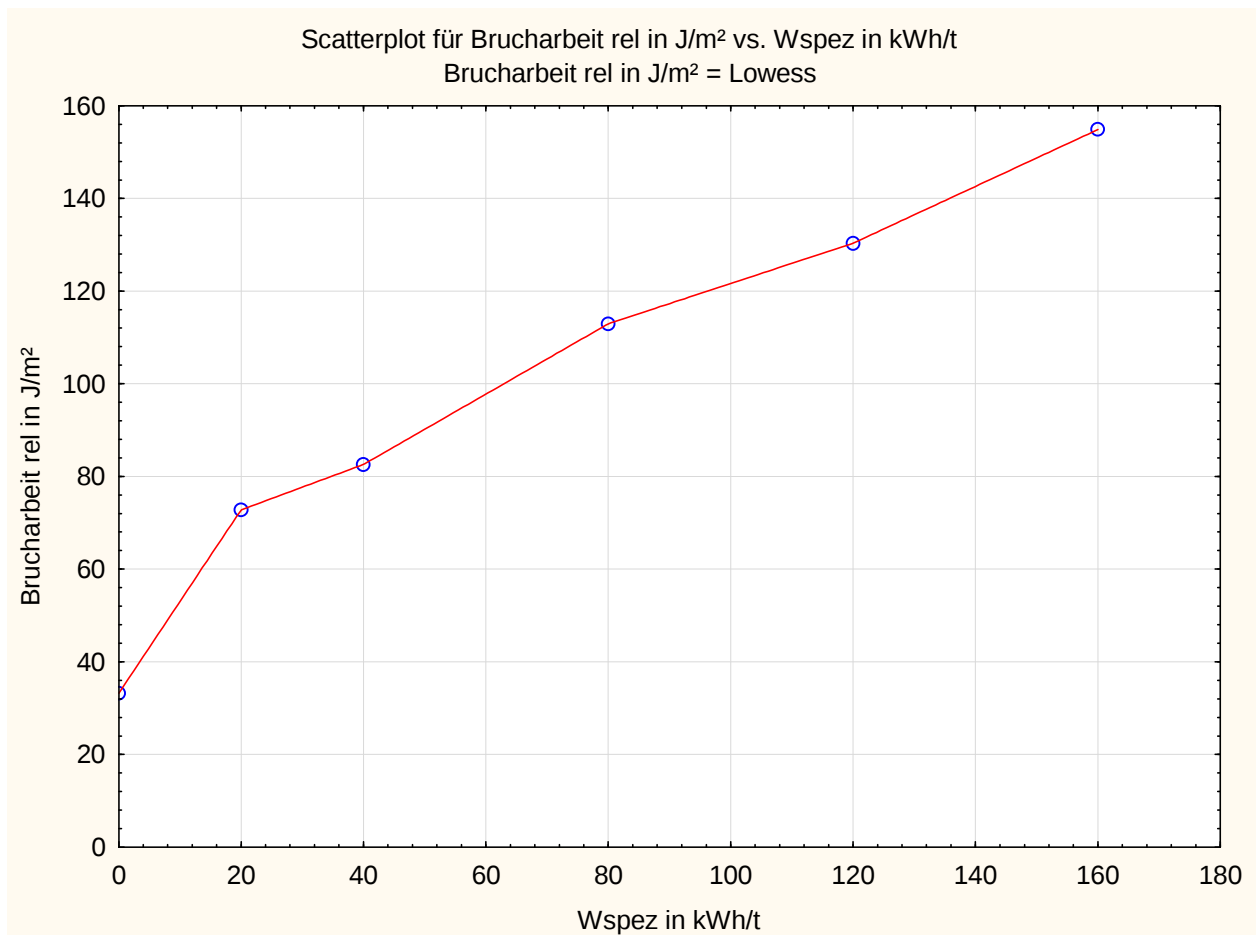


Abbildung 26: Entwicklung der Brucharbeit bei der Mahlung des Zellstoffs

Der Vergleich der **Abbildungen 25** und **26** zeigt, dass der gemahlene Zellstoff mit 150 J/m² rund das drei- bis fünffache Arbeitsvermögen aufbringen kann im Vergleich zu den anderen untersuchten Faserstoffen.

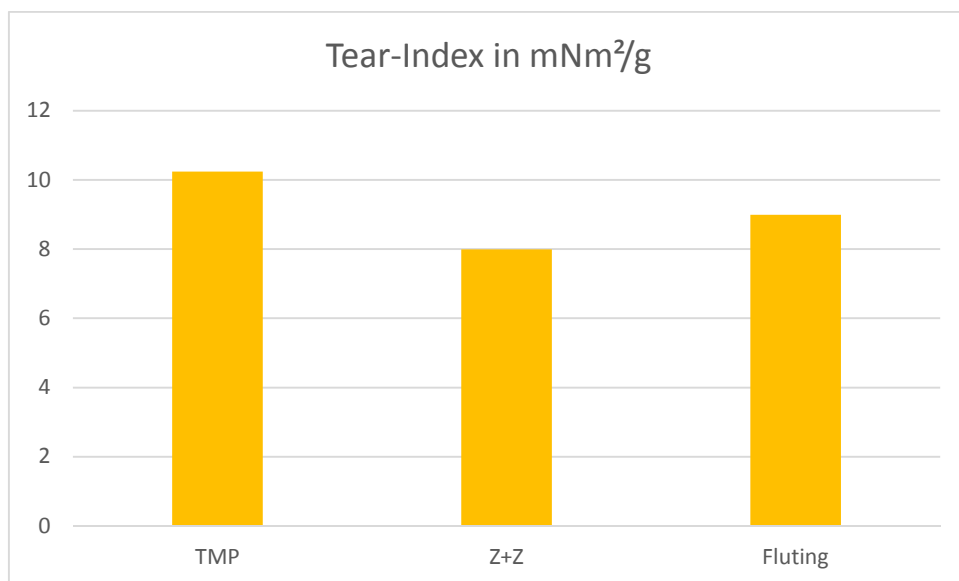


Abbildung 27: Durchreißfestigkeit nach Elmendorf der Substrate

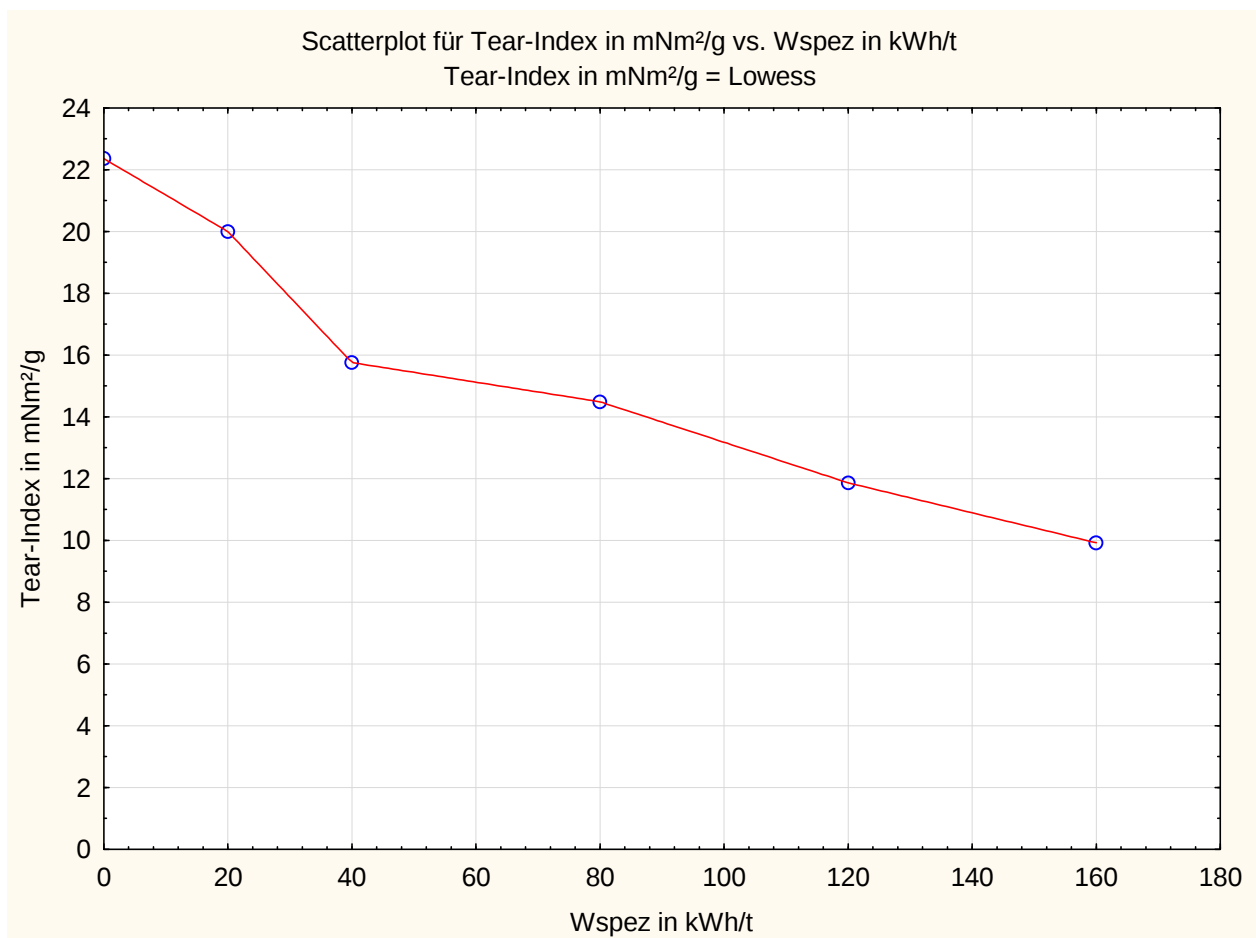


Abbildung 28: Entwicklung der Durchreißfestigkeit bei der Zellstoffmahlung

Die Durchreißfestigkeit eines Faserstoffes wird sehr stark von der Faserlänge beeinflusst. Die mittlere Faserlänge der Altpapierstoffe liegt etwa bei 1 mm. Beim ungemahlenen Zellstoff ist sie etwa doppelt so hoch und der TMP-Stoff wird immerhin noch um 25% übertroffen. Dies korreliert insgesamt sehr gut mit den Tear-Indices, die in den **Abbildungen 27** und **28** dargestellt sind. Leider ist es auch bei schonender Mahlbehandlung – dafür spricht die Reduzierung der Faserlänge des Zellstoff von ursprünglich 2,2 mm auf 1,6 mm bei der Applikation von 160 kWh/t – nicht möglich, die Durchreißfestigkeit des Zellstoffes über dessen ursprünglich schon sehr hohes Niveau von 22 mNm^2/g zu steigern.

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass die Altpapiere hinsichtlich ihrer Eigenschaftskennwerte den Erwartungen entsprechen. Der TMP-Stoff hat eine sehr hohe Qualität und der Zellstoff erwartungsgemäß von allen Faserstoffen das größte Potential, das sich durch Mahlung dann auch noch entwickeln läßt.

4.2 Experimentelle Lösungswege für die Entwässerung mit dem FiberXpress

Vorversuche haben ergeben, dass die mit Hilfe des FiberXpress erreichbaren Trockengehalte bereits sehr stark von der Vorentwässerung abhängig sind. Die Hauptentwässerung funktioniert nur dann optimal, wenn nach der Vorentwässerung im Pad in der Nähe des Siebes noch ausreichend große Poren zur Verfügung stehen. Im Folgenden wird auf diese Zusammenhänge näher eingegangen.

4.2.1 Vorentwässerung

Von den Entwicklern des FiberXpress war die Vorentwässerung ursprünglich dazu vorgesehen, den Entwässerungsvorgang, der während der Blattbildung stattfindet, zu simulieren. Dabei wird vom Gerät

ein Trockengehalt von 20% angefahren. Dieser Wert ist fix. Variabel ist der Druck. Die Zeit, die bis zum Erreichen des Trockengehalts von 20% vergeht, wird registriert. Es stellt sich zunächst die Frage, ob es sinnvoll ist, die Vorentwässerung durchzuführen, da sie unter Umständen die Analysedauer erheblich erhöht.

Die Beantwortung dieser Frage konnte anhand von Untersuchungen an hochausgemahlenen Zellstoffen und mikrofibrillärer Cellulose (MFC) abgeleitet werden. Verzichtete man bei diesen Substraten etwa aus Zeitgründen auf die Vorentwässerung, dann wurden unverhältnismäßig niedrige Trockengehalte (respektive unverhältnismäßig hohe Werte für das WRV) gemessen. Die Erklärung dafür liefert die WAHLSTRÖM'sche Pressentheorie, die sich auf diese Weise gleichzeitig auch wieder bestätigte. Zur Erläuterung soll die nachfolgende Skizze beitragen, die den Entwässerungsvorgang im FiberXPress beschreiben soll.

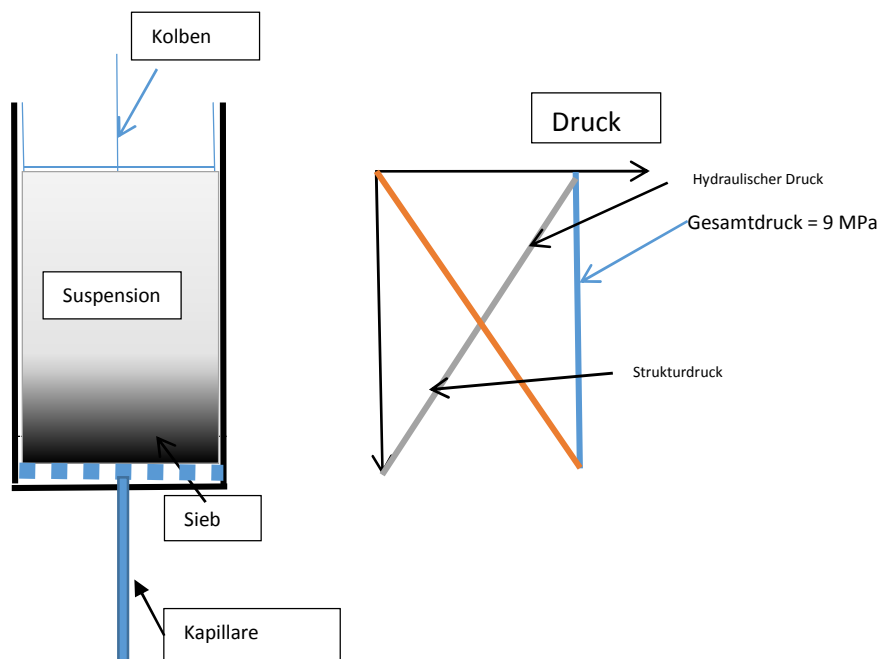


Abbildung 29: Entwässerungsvorgang und Druckverteilung im FiberXPress

Die Pressentheorie besagt einerseits, dass die Summe aus hydraulischem und Strukturdruck konstant ist und dem Gesamtdruck entspricht. Andererseits besagt sie, dass an den Orten, an denen Wasser fließen kann, der hydraulische Druck zu Null wird. Dies ist beim FiberXPress unten am Sieb der Fall. Im Umkehrschluß erreicht also gerade am Sieb der Strukturdruck, der für die Kompression des Pads verantwortlich ist, sein Maximum. Das heißt, das Pad wird unmittelbar am Sieb am stärksten verdichtet. Dabei wird die Struktur ab Flächenmassen des Pads etwa bei 2000 g/m^2 im unteren Teil des Gerätes so kompakt, dass kein Wasser durch sie hindurchfließen kann. Dort, wo das Pad mit dem Kolben in Kontakt war, ist sie hingegen weich, ggf. sogar noch fließfähig.

Um den genannten Einfluß, der z.B. bei der Ermittlung des WRV mit Hilfe des Gerätes zu gravierenden Fehlern führen würde, zu eliminieren, werden alle Untersuchungen generell **mit** Vorentwässerung durchgeführt.

Der freibleibende Parameter für die Vorentwässerung ist also der Druck, der nach Vorwahl zeitlich konstant bleibt. Hier hat sich in den meisten Fällen die Anwendung von $0,5 \text{ MPa}$ als praktikabel erwiesen. Nur in sehr extremen Fällen, z.B. bei MFC, sind noch geringere Drücke notwendig, in der Regel

0,2 MPa. Dabei steigt die Analysedauer auf bis zu 8 Stunden! Für wissenschaftliche Zwecke kann dies gerechtfertigt sein, für Routineuntersuchungen eher nicht.

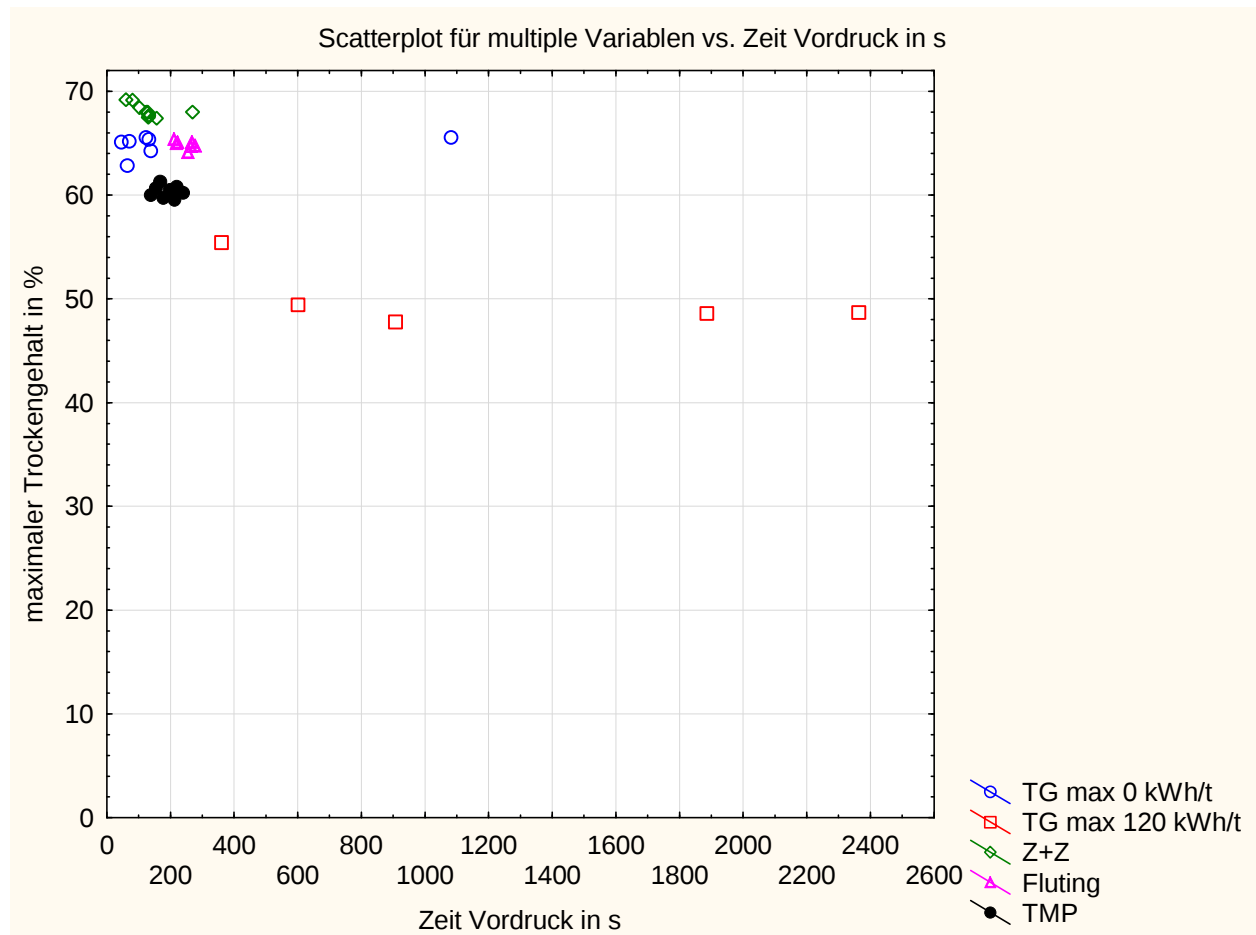


Abbildung 30: Einfluß der Vorentwässerungsdauer auf den maximalen Trockengehalt

Insbesondere bei Zellstoffen kann die Zeitdauer der Vorentwässerung bis 20% Trockengehalt erreicht sind, stark schwanken. Dies hängt mit der Verformung zusammen die das Sieb in dem Bereich erfährt, in dem die Kapillare ansetzt. Als Folge der Verformung lagern sich in diesem Gebiet Feinstoffe ein und das Sieb muß ersetzt werden. Es ist daher wichtig zu wissen, ob unterschiedlich lange Vorentwässerungszeiten den maximal erreichbaren Trockengehalt signifikant beeinflussen. In **Abbildung 30** ist dieser Zusammenhang dargestellt. Exemplarisch wurden Pads mit einer Flächenmasse von 2000 g/m² ausgewählt. Dies gilt auch für alle nachfolgenden Darstellungen. Der Druck betrug in jedem Fall 0,5 MPa. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist von der Zellstoffmahlreihe nur der ungemahlene Stoff (0 kWh/t) und der Stoff mit 120 kWh/t dargestellt. Die meisten Meßpunkte finden sich im linken oberen Teil des Diagramms bei Trockengehalten zwischen 60% und 70% und Entwässerungszeiten von bis zu 300 s. Dabei belegt jedes Substrat einen für sich charakteristischen Bereich. Bei Zellstoffen ist charakteristisch, dass die Entwässerungszeiten stark schwanken können. Das gilt auch bereits für ungemahlene Langfaserzellstoffe. Die statistische Auswertung (Signifikanztest, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%) ergab, dass der erreichbare maximale Trockengehalt für das jeweilige Substrat nicht von der Vorentwässerungsdauer abhängt.

4.2.2 Hauptentwässerung

Bei der Hauptentwässerung ist es möglich, der im Sekundentakt ablaufenden Zeit für jede Sekunde einen Solldruck vorzugeben. Auf diese Weise könnte man theoretisch Druckprofile erzeugen. In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass maximale Trockengehalte dann erreicht werden, wenn der Vordruck

möglichst hoch und zeitlich konstant ist. Das Meßgerät läßt Drücke bis 10 MPa zu. Aus Sicherheitsgründen wurde der maximale Entwässerungsdruck auf 9 MPa beschränkt. Die Zeitdauer der Messung liegt analog zur WRV-Bestimmung bei 900 s.

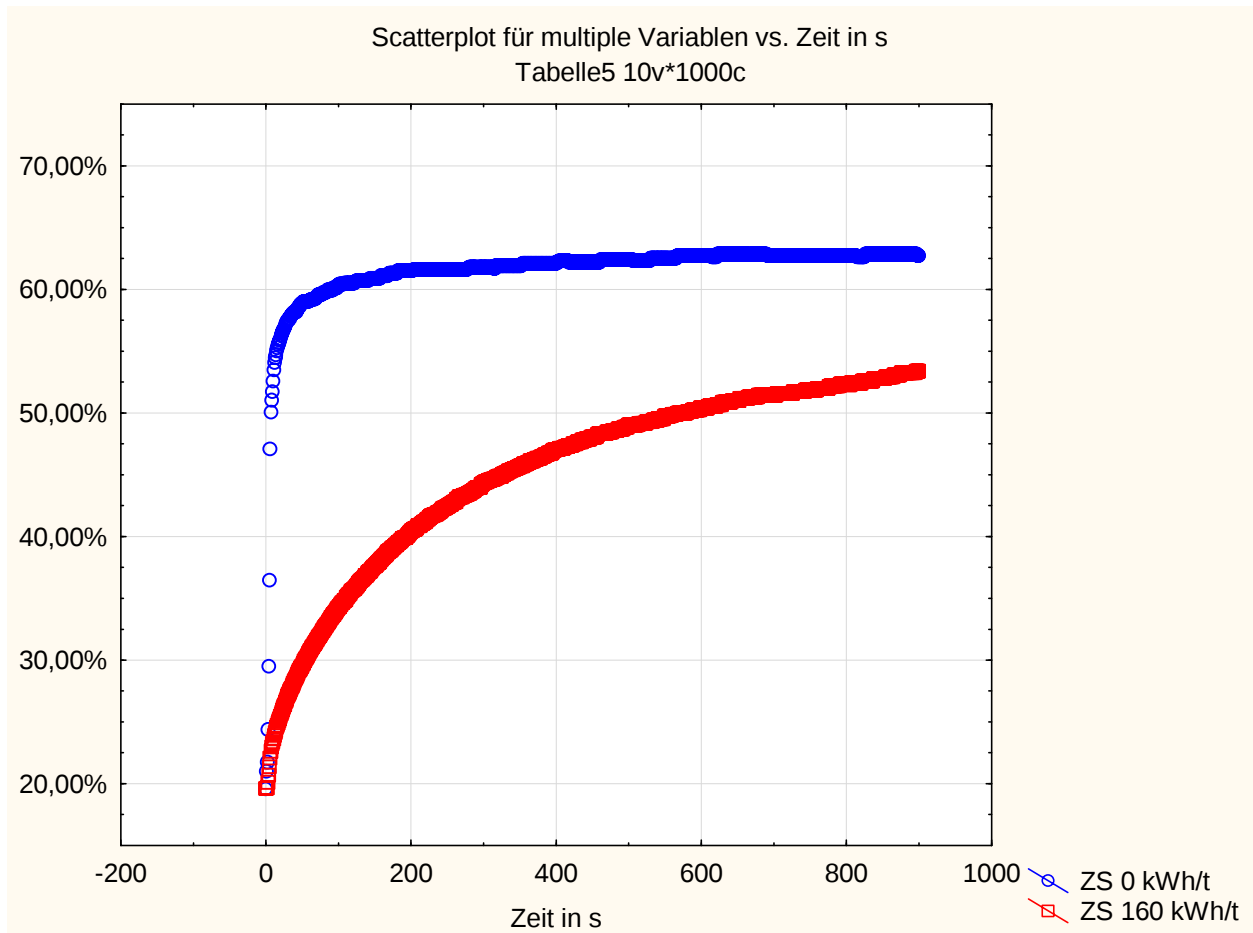


Abbildung 31: Entwässerungskennlinie des ungemahlten und des gemahlten Zellstoffs

Die folgenden beiden **Abbildungen 31** und **32** zeigen den zeitlichen Verlauf des Entwässerungsvorgangs bei einem Hauptdruck von 9 MPa und Flächenmassen der Pads von 2000 g/m². Es ergibt sich, dass beim ungemahlten Zellstoff und bei Zeitungen und Zeitschriften, TMP und Fluting die Entwässerung sehr zügig erfolgt. Nach 400 s bis 600 s ist in der Regel schon der Endwert erreicht. Dieser Trend ist für die meisten Faserstoffe zutreffend, die bisher mit dem Gerät untersucht wurden. Die rote Kurve in **Abbildung 31** zeigt die Verhältnisse für den fibrillierend gemahlten Zellstoff, der 160 kWh/t Mahlenergie appliziert bekommen hat. Dabei wird erkennbar, dass nach 900 s offensichtlich noch kein maximaler Trockengehalt erreicht werden kann. Diese Erscheinung wurde auch bei MFC beobachtet. Aus technischen Gründen beträgt die maximale Entwässerungsdauer des FiberXPress 1000 s. Die im Rahmen dieses und anderer Projekte gewonnenen Erkenntnisse legen nahe, Veränderungen zu programmieren, die zu Forschungszwecken auch längere Perioden für die Hauptentwässerung zulassen, um gewisse physikalischen Grenzen besser abbilden zu können.

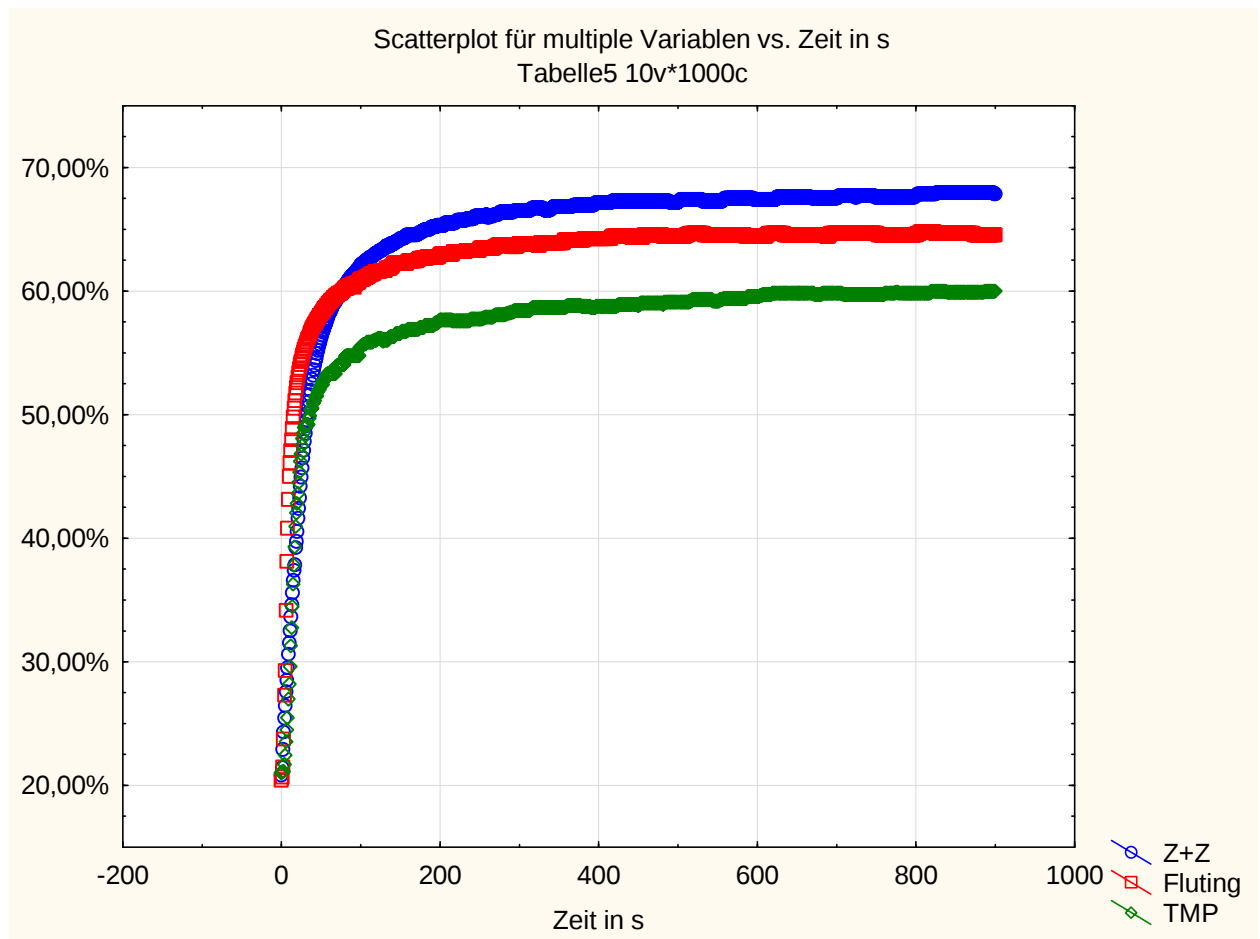


Abbildung 32: Entwässerungskennlinien für Altpapier und TMP bei 2000 g/m²

Für die drei Substrate in **Abbildung 32** ist die Entwässerungsdauer von 900 s ausreichend. Die maximalen Trockengehalte der Faserstoffe liegen zwischen 54% und 76%, wobei auch die Flächenmasse der Pads einen Einfluß hat, der im folgenden Abschnitt näher untersucht wird.

4.2.3 Flächenbezogene Masse der Pellets

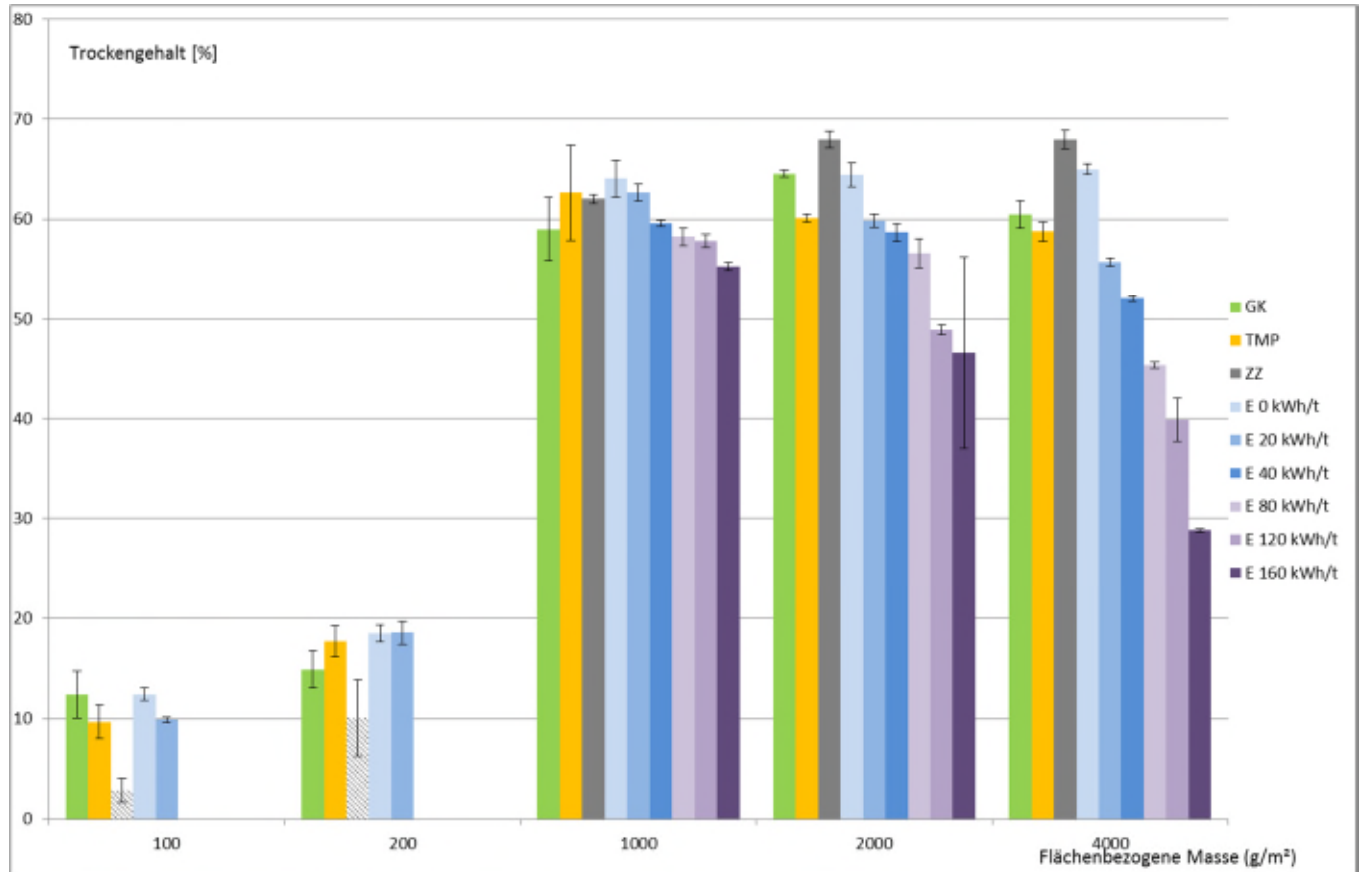


Abbildung 33: Einfluß der flächenbezogenen Masse auf die Endtrockengehalte (GK=Fluting)

Zu Beginn der Arbeiten am Projekt wurde von den Partnern diskutiert, ob es möglich ist, Festigkeitsprüfungen an den 20 cm² großen Pellets durchzuführen. Die dafür notwendige Technik ist an der PTS vorhanden. Dafür benötigt man allerdings flächenbezogene Massen der Pads von etwa zwischen 100 g/m² und 200 g/m². Es ist anzumerken, dass die Fa. Voith als Gerätehersteller die Herstellung derartiger Flächenmassen softwareseitig blockiert hat und in der Bedienungsanleitung auch nicht empfiehlt. Die Empfehlungen liegen zwischen 1000 g/m² und 4000 g/m². Eine Änderung an der Software erlaubte dann doch die niedrigen Flächenmassen herzustellen. Dabei traten Probleme auf, den Faserstoff mit gleichmäßiger Dicke über das Sieb zu verteilen. Es empfahl sich, die Stoffdichte von ausgangs 4% auf Werte unter 1% zu senken. Dabei traten Probleme mit der Abdichtung auf, die jedoch gelöst werden konnten. Trotzdem blieb die Formation unbefriedigend. Im nächsten Schritt verzichtete man auf die Vorentwässerung. Auch dadurch konnte das Problem nicht gelöst werden. An den sehr niedrigen Trockengehalten (siehe **Abbildung 33**) erkennt man sehr deutlich, dass die Kraftübertragung vom Kolben auf das sich bildende Pad völlig unzureichend war. Letztlich wurde die Idee verworfen.

Flächenmassen von 1000 g/m² und darüber sind hingegen unter normalen Betriebsbedingungen des Gerätes möglich. Nach dem Entwässerungsvermögen muß man die Betrachtung der **Abbildung 24** differenziert vornehmen für gut entwässerbare Substrate – hier Zeitungen und Zeitschriften, Fluting und TMP sowie der ungemahlene Zellstoff – und schwer entwässerbare Stoffe (die Zellstoffmahlreihe).

Bei den gut zu entwässernden Faserstoffen steigt der maximale Trockengehalt mit zunehmender Flächenmasse leicht an. Dies ist wahrscheinlich der verbesserten Kraftübertragung vom Kolben auf das Pad zuzuschreiben. Beim gemahlene Zellstoff wirkt der Einfluß der Flächenmasse in die entgegengesetzte Richtung: Steigende Flächenmassen führen zu niedrigeren Trockengehalten. Dies liegt daran, dass die Entwässerungsdauer von 900 s in diesen Fällen nicht ausreichend ist, um den physikalisch

möglichen Grenzwert zu erreichen, wie auch schon aus **Abbildung 31** erkennbar. Die Pads dieser Flächenmassen (1000 g/m², 2000 g/m² und 4000 g/m²) wurden an den Kooperationspartner, die PTS, weitergegeben.

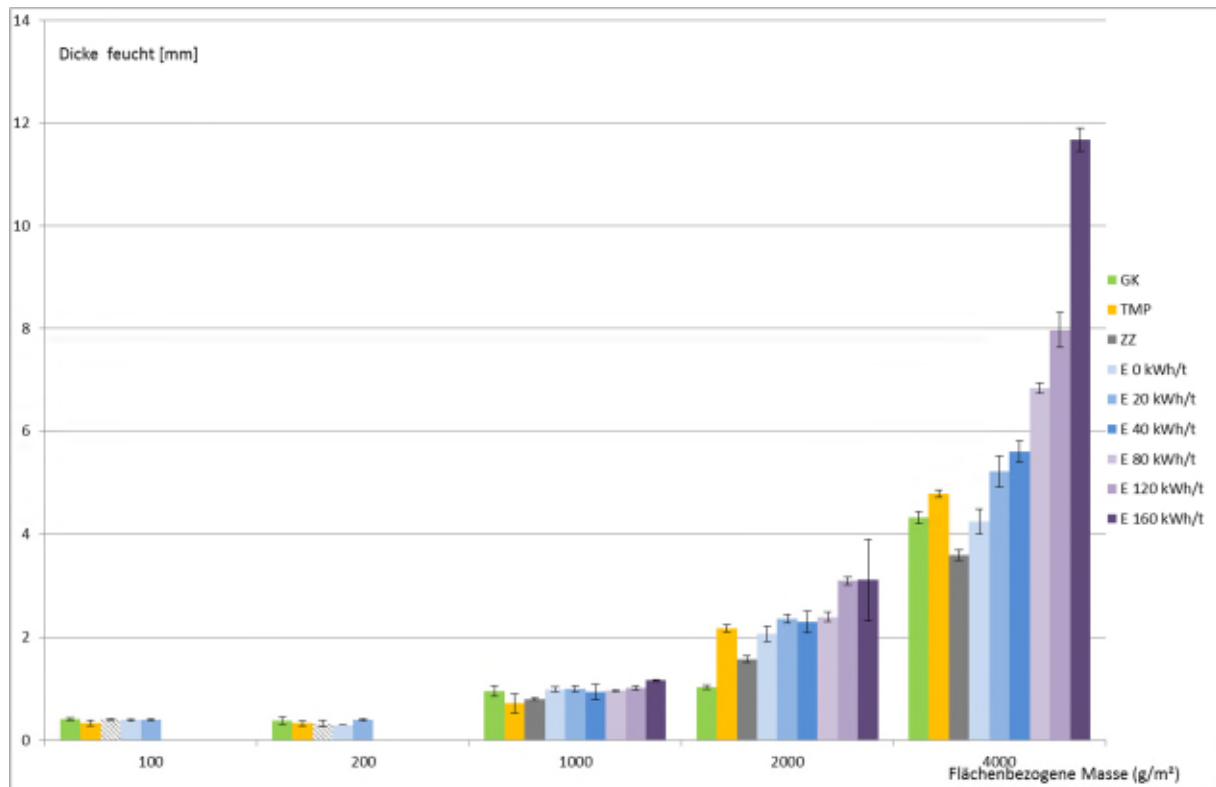


Abbildung 34: Dicke der feuchten Pads (GK=Fluting)

Die vorgenannten Erklärungen der Abhängigkeit des Trockengehaltes von der flächenbezogenen Masse werden auch durch die Dickenmessung der feuchten Pads (**Abbildung 34**) nochmals bestätigt. Bei 1000 g/m² sind alle Pads etwa ähnlich dick. Wäre die Wasserentfernung von der Flächenmasse unabhängig und immer gleich, dann müsste jede Verdopplung auch eine Verdopplung der Dicke bewirken (100 g/m² und 200 g/m² ausgeklammert). Beim Übergang von 1000 g/m² auf 2000 g/m² trifft das für Altpapiere, TMP und niedrig ausgemahlene Zellstoff (bis 80 kWh/t) auch einigermaßen genau zu. Bei 4000 g/m² weichen die Zellstoffe von dieser Tendenz jedoch aufgrund der höheren Wassermengen, die sie enthalten, deutlich nach oben ab. Der Verdopplungstendenz folgt der TMP am besten. Da er sehr inkompressibel ist (Vertreter des strukturdrukbegrenzten Pressen), kann auch eine evtl. verbesserte Kraftübertragung bei höheren Flächenmassen dem Trend Proportionalität mit der Dicke nicht verändern.

4.3 Permeabilitätseigenschaften der Substrate

Die Meßergebnisse, die der FiberXPress liefert, ermöglichen es, die Ansätze von Hagen-Poiseuille und d 'Arcy zu bewerten. Beide Ansätze berücksichtigen jedoch nicht das Problem der Kompression (Dickenänderung, Parameter „l“). Eine weitere Hürde ist die Ermittlung des Volumenstroms, den wir aus der Dichte und der Massendifferenz zweier aufeinanderfolgenden Meßtakte ermittelten. Die Waage, die dafür zur Verfügung stand, verfügt über eine Genauigkeit von ± 0,01 g. Da die Entwässerung bereits nach kurzer Zeit tropfenweise erfolgt, kommt es zum „Rauschen“ beim Volumenstrom (erkennbar an den Zick-Zack-Linien in **Abbildung 35**). Diese Einschränkungen können momentan nicht überwunden werden. Immerhin erschien es sinnvoll, die Permeabilitätskonstante (k) und den Porenradius (r) we-

nigstens größenordnungsmäßig abzuschätzen, wenn die oben erwähnten Restriktionen schwach wirksam sind, d.h. wenn sich die Dicke nur wenig ändert und noch relativ viel Wasser fließt, also in den ersten Sekunden des Meßvorgangs.

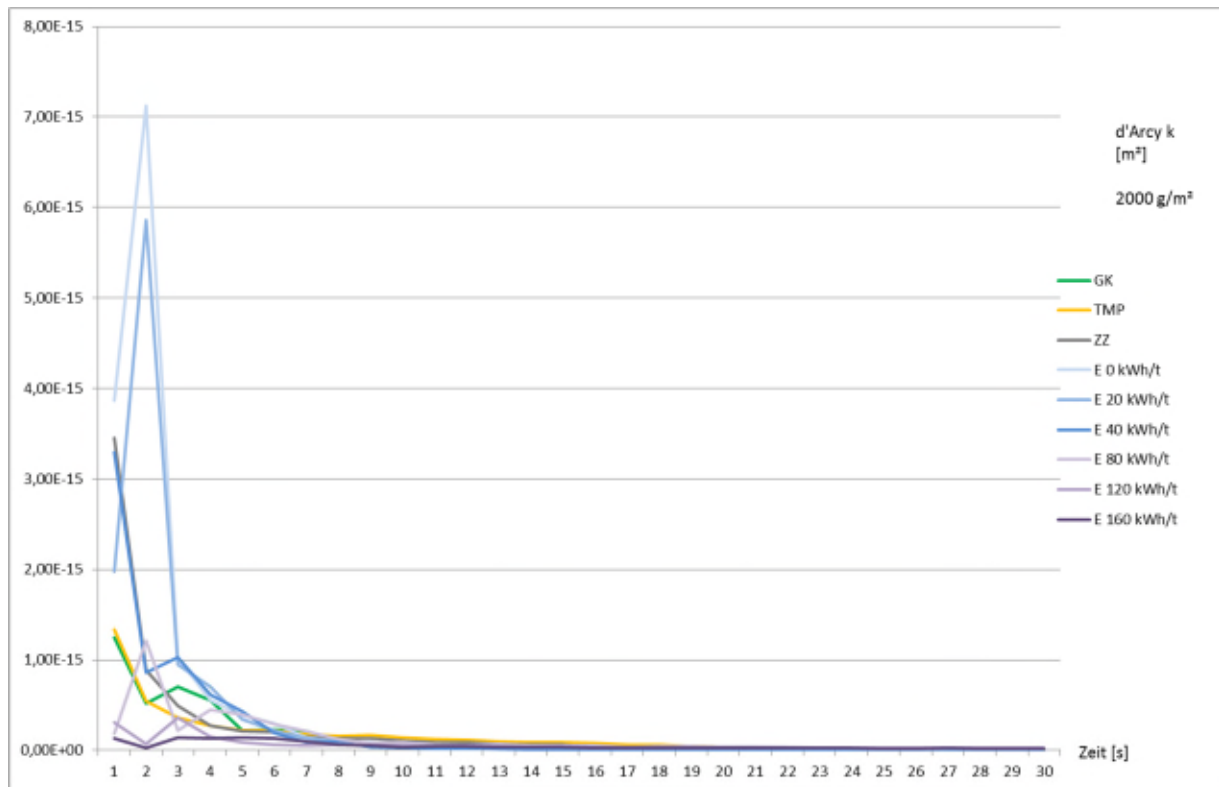


Abbildung 35: Ermittlung der Permeabilitätskonstante k

Den höchsten Wert für die Permeabilitätskonstante weist erwartungsgemäß der ungemahlene Zellstoff auf. Mit zunehmender Intensität der Mahlbehandlung (hier: W_{spez}) geht dieser Wert stark zurück. Die Maximalwerte für k sind in nachfolgender **Tabelle 1** gelistet.

Tabelle 1: Maximalwerte der Permeabilitätskonstante k

Faserstoff	Fluting	TMP	Z+Z	Ungebleichter Sulfatzellstoff					
W_{spez} in kWh/t				0	20	40	80	120	160
k in 10^{-17} m^2	1,25	1,33	8,83	7,12	5,86	3,30	1,03	0,36	0,14

Die gleichen meßtechnischen Randbedingungen wie bei der Messung von k gelten auch für die Ermittlung des Porenradius r. Die Ergebnisse enthält **Tabelle 2**.

Tabelle 2: Maximalwerte des Porenradius r

Faserstoff	Fluting	TMP	Z+Z	Ungebleichter Sulfatzellstoff					
W_{spez} in kWh/t				0	20	40	80	120	160
r in 10^{-6} m	49,7	37,3	45,8	61,2	57,9	47,5	38,2	36,5	27,1

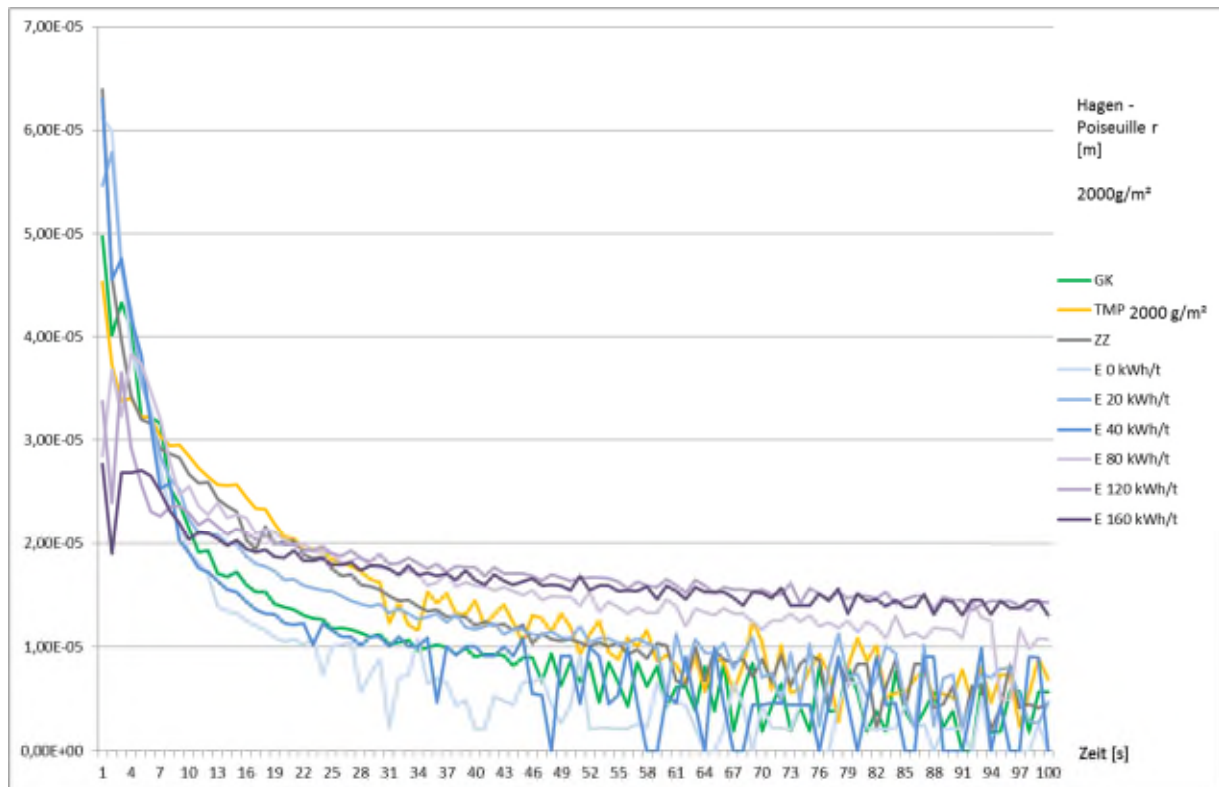


Abbildung 36: Ermittlung des Porenradius r

4.4 Kennwerte für den Entwässerungsvorgang

Da die Ermittlung von k und r , wie im vorangegangenen Abschnitt 4.3 gezeigt, zu sehr kleinen Meßwerten führt und zudem auch noch mit relativ großen Unsicherheiten behaftet ist, war es wünschenswert auf empirischem Wege andere Kennwerte zu finden, die das Entwässerungsverhalten aller Faserstoffe normieren können. Dabei gab es folgende Grundüberlegung: Das Meßgerät zeichnet den zeitlichen Verlauf der Entwicklung des Trockengehalts auf, wie in den **Abbildungen 31** und **32** dargestellt. Bei einem Substrat ohne Strömungswiderstand würde sofort nach dem Anlegen des Hauptdrucks der Trockengehalt ohne jegliche zeitliche Verzögerung auf einen Maximalwert, häufig den Endwert des Trockengehaltes, springen. Dies entspricht einem Rechtecksprung analog etwa der Fermi-Dirac Funktion. Berechnet man für einen allgemeinen Fall die Fläche A unter den Kurven aus den **Abbildungen 31** und **32** dann ergibt sich Gleichung (5):

$$A = \int_{t_1}^{t_2} TG(t) dt \quad (5)$$

Dabei bedeuten:

A....Fläche unter der Kurve der zeitlichen Entwicklung des Trockengehalts in s

t..... Entwässerungszeit in s

TGTrockengehalt absolut ($0 \leq TG \leq 1$).

Der Wert für A ist aus einer numerischen Integration der Meßwerte des FiberXPress leicht zu berechnen. Die Fläche für das vorher beschriebene ideale Substrat $A_{\max}$ wäre 900 s (Sprung des TG von 0 auf den maximalen Trockengehalt der Meßreihe zu Beginn der Entwässerung, dann 900 s lang konstant beim maximalen Trockengehalt der Meßreihe). Dies ergibt ein Rechteck in das die Entwässerungskurve einbeschrieben ist. Daraus läßt sich ein empirischer Entwässerungskennwert EK berechnen zu:

$$EK = \frac{A}{A_{max}} \quad (6)$$

Der Kennwert EK ist dimensionslos. Er kann höchstens zu 1 werden (Substrat hat keinen Fließwiderstand oder ist vollständig permeabel). Die nachfolgende **Tabelle 3** zeigt die Verhältnisse für die Meßreihen bei einer flächenbezogenen Masse von 2000 g/m²

Tabelle 3: Entwässerungskennwert EK

Faserstoff	Fluting	TMP	Z+Z	Ungebleichter Sulfatzellstoff					
W_{spez} in kWh/t				0	20	40	80	120	160
EK	0,9793	0,9176	0,9572	0,9724	0,9599	0,9393	0,9637	0,8989	0,8486

TMP zeigt Abweichungen nach unten, die wahrscheinlich eine Folge des Strukturwiderstands sind. Ansonsten verhalten sich die untersuchten Faserstoffe ziemlich ähnlich. Im Falle des gemahlenen Zellstoffs zeigt sich die schwieriger werdende Entwässerung mit zunehmender Intensität der Mahlung deutlich. Der Wert für 80 kWh/t ist eher als Ausreißer zu interpretieren.

4.5 Transformation auf produktionsrelevante flächenbezogene Massen

Die Entwässerung der Pads bei Flächenmassen von in unserem Falle 2000 g/m² ist gerätetechnisch bedingt und soll eine optimale Kraftübertragung vom Preßkolbens in den Faserstoff sicherstellen. Da derartige Flächenmassen außer vielleicht im Bereich der Pappeproduktion nicht praxisrelevant sind, wird im Folgenden der Versuch unternommen, die Verhältnisse auf eine flächenbezogene Masse von 50 g/m² umzurechnen. Als Hilfsmittel zur Umrechnung dient die Permeabilitätskonstante k . Der Volumenstrom, der beim Pressen aus einer bestimmten Fläche austritt, ergibt sich aus Gleichung (7).

$$\dot{V}_A = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{(TG_A - TG_E)m_A}{TG_A TG_E \Delta t} \quad (7)$$

Dabei bedeuten:

$\dot{V}_A$Flächenaustrittsvolumenstrom

$\dot{V}$Volumenstrom

A....Fläche

TG.... Trockengehalt

m_Aflächenbezogene Masse

t....Zeit

Indices: E....einlaufseitig A....auslaufseitig

Durch Einsetzen der Gleichung (7) in die D Árcy-Gleichung (2) erhält man für den Druck:

$$\Delta p = \frac{\dot{V}_A \eta l}{k} \quad (8)$$

Für die Linienkraft einer Walzenpresse gilt dann entsprechend:

$$F_L = \frac{b_{Nip} \dot{V}_A \eta l}{k} \quad (9)$$

Dabei bedeuten:

F_LLinienkraft in kN/m

b_{Nip}Breite des Pressnips in m

Die Ergebnisse der Berechnungen finden sich in der **Tabelle 4**. Der Eingangstrockengehalt wurde dafür zu 20%, der Ausgangstrockengehalt zu 65% angenommen.

Tabelle 4: Umrechnung des Preßdrucks nach der D'Arcy-Beziehung

Faserstoff	Fluting	TMP	Z+Z	Ungebleichter Sulfatzellstoff					
W_{spez} in kWh/t				0	20	40	80	120	160
k in $10^{-17} m^2$	1,25	1,33	8,83	7,12	5,86	3,3	1,03	0,36	0,14
Dicke in mm	6,1	7,2	6,98	6,73	7,35	7,65	8,08	7,8	8,22
Dicke in mm	0,15	0,18	0,17	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21
Druck in kPa	1379,39	1530,20	223,44	267,18	354,53	655,26	2217,38	6124,33	16596,25

Die erste Dickenangabe bezieht sich auf die Dicke des feuchten Pads zum Zeitpunkt der Ermittlung von k (in der Regel nach 4 s Preßdauer) am Pad mit 2000 g/m². Der zweite Wert der Dicke ist die proportionale Umrechnung auf eine flächenbezogene Masse von 50 g/m². Scheinbar liegt der Pressdruck bei Zeitungen und Zeitschriften, TMP und Fluting sowie dem ungemahlenen oder wenig gemahlenen Zellstoff (bis 80 kWh/t) im Bereich dessen, was technisch bereits jetzt ohne Schwierigkeiten realisierbar ist. Es muß jedoch berücksichtigt werden, dass im FiberXPress dafür Pressimpulse von ca. 10 MPas notwendig waren. Was das für die Auslegung einer Presse bedeutet, darauf wird in Abschnitt 4.7 näher eingegangen.

4.6 Bewertung der Recyclingfähigkeit der gepreßten Proben

4.6.1 Dichte und Trockengehalte der gepressten Pellets

4.6.1.1 Fluting

In den Pressversuchen der Stoffprobe Fluting wurden im Pressensimulator bei Flächengewichten < 1.000 g/m² deutlich höhere Blattdichten erzielt als bei der herkömmlichen Blattbildung im Labor bzw. an der Papiermaschine. Die höchste Blattdichte von > 0,82 g/cm³ wurde bei einer Flächenmasse von mehr als 2.000 g/m² erreicht. Die Blattdichte nach der Pressung war 43 % höher als im Standard-Prüfblatt und 32 % höher als auf der Papiermaschine. Die Herstellung geeigneter Presslinge mit einer niedrigen Flächenmasse von 100 bzw. 200 g/m² war nicht in zufrieden stellender Qualität möglich, die erzielten Dichtewerte waren viel zu niedrig und die Blatthomogenität war sehr schlecht.

Tabelle 5: Übersicht zu den Grundeigenschaften der Presslinge, Probe Fluting

Reihe X							
mA [g/m ²]	Bezeichnung	Dicke (Mitte) [mm]	Dicke (Rand) [mm]	Rauhigkeit BENDTSEN Oberseite [ml/min]	Rauhigkeit BENDTSEN Unterseite [ml/min]	Luftdurchlässigkeit GURLEY [s]	Dichte [g/cm ³]
95,6	Prüfblatt X 1	166		844	1429	33	0,58
97,4	Maschinenp. (Jass)	155		1587	1465	42	0,63
103	Pressling 13	0,427	0,375	Probe zu klein		4	0,24
104	Pressling 14	0,445	0,438			10	0,23
108	Pressling 15	0,441	0,422			11	0,24
217	Pressling 16	0,587	0,545			30	0,37
210	Pressling 18	0,628	0,601			24	0,33
213	Pressling 19	0,605	0,580			26	0,35
1096	Presling 6	1,425	1,451			126	0,77
1081	Pressling 8	1,537	1,563			264	0,70
1071	Pressling 11	1,371	1,303			246	0,78
2121	Pressling 28	2,568	2,588				0,83
2079	Pressling 29	2,533	2,451				0,82
2077	Pessling 30	2,420	2,330				0,86
4232	Pressling 37	5,134	5,139				0,82
4357	Pressling 38	5,305	5,324				0,82
4121	Pessling 40	4,994	5,013				0,83

4.6.1.2 Mischung aus 50% Zeitungen und 50% Zeitschriften (Z+Z)

Bei der Probe aus grafischem Altpapier wurde durch die Pressung im Fibrexpress eine im Vergleich zur herkömmlichen Labor-Blattbildung um 38 % erhöhte Blattverdichtung erzielt. Der Maximalwert der Blattdichte war höher als bei der Probe aus Fluting.

Der Trockengehalt nach dem Pressvorgang betrug 76 % und war damit ebenfalls höher als bei der Probe aus Fluting.

Tabelle 6: Übersicht zu den Grundeigenschaften der Presslinge, Probe Zeitungen + Zeitschriften

Reihe Z+Z							
mA [g/m ²]	Bezeichnung	Dicke (Mitte) [mm]	Dicke (Rand) [mm]	Rauhigkeit BENDTSEN Oberseite [ml/min]	Rauhigkeit BENDTSEN Unterseite [ml/min]	Luftdurchlässigkeit GURLEY [s]	Dichte [g/cm ³]
99	Prüfblatt	156		637	376	123,3	0,63
106	Pressling Z 24	0,437	0,394	Probe zu klein		25,6	0,24
102	Pressling Z 25	0,527	0,475			7,2	0,19
105	Pressling Z 26	0,536	0,504			8,8	0,20
197	Pressling Z 14	0,513	0,506			44,1	0,38
202	Pressling Z 15	0,496	0,471			42,8	0,41
202	Pressling Z 16	0,583	0,553			53,9	0,35
1054	Presling Z 11	1,422	1,428			624	0,74
1072	Pressling Z 12	1,379	1,395			114	0,78
1087	Pressling Z 13	1,420	1,500			234	0,77
2064	Pressling Z 2	2,353	2,376				0,88
2131	Pressling Z 8	2,446	2,411				0,87
2131	Pessling Z 9	2,572	2,561				0,83
4076	Pressling Z 20	4,578	4,445				0,89
4140	Pressling Z 21	4,806	4,665				0,86
4280	Pessling Z 22	4,921	4,959				0,87

Der Trockengehalt der verdichteten Pellets nach der Pressung betrug 69 %.

4.6.1.3 TMP Stoff

Der TMP-Faserstoff konnte durch Nasspressen auf einen Endtrockengehalt von 60 % entwässert werden.

4.6.1.4 Zellstoffmahlreihe

In der Zellstoff-Mahlreihe verringerte sich der erzielbare maximale Trockengehalt und damit zusammenhängend auch die Blattdichte mit fortschreitender Mahlbehandlung des Faserstoffes.

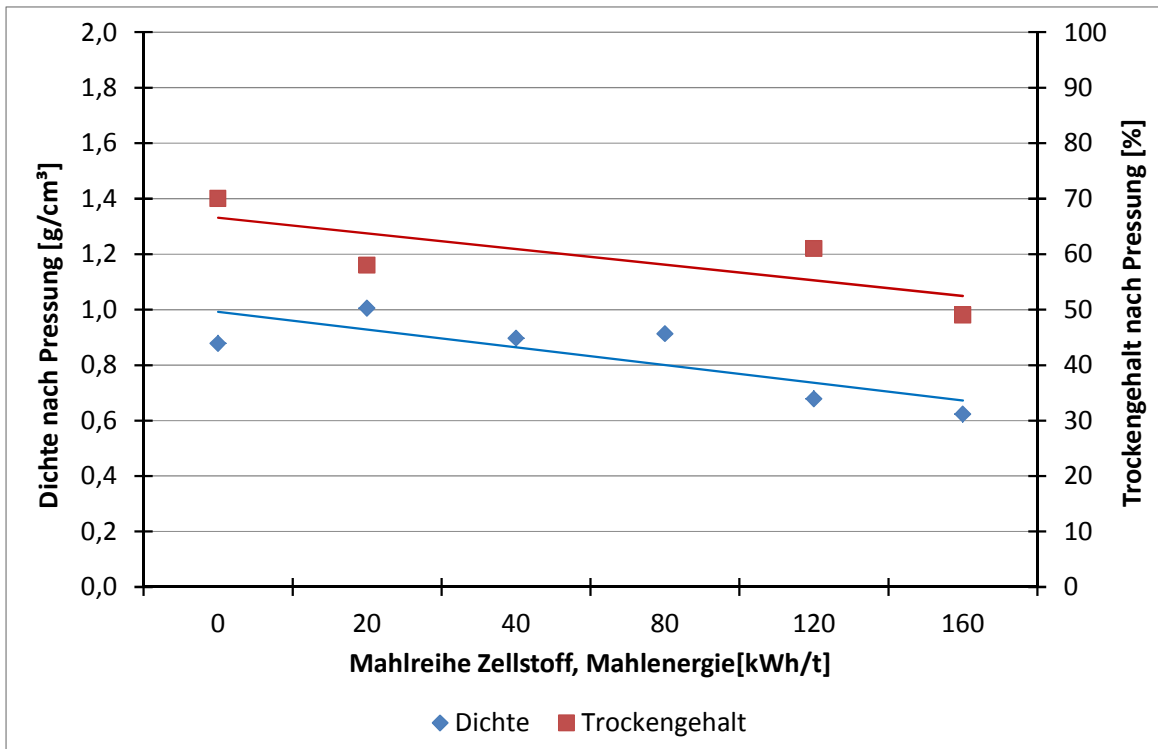
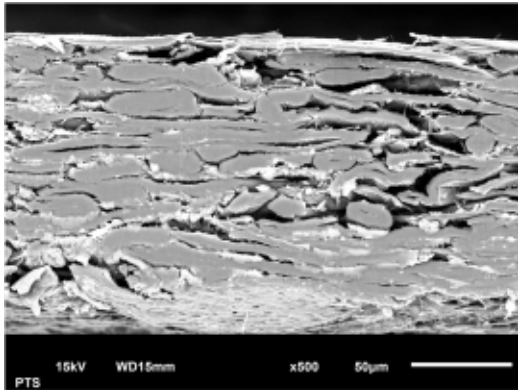


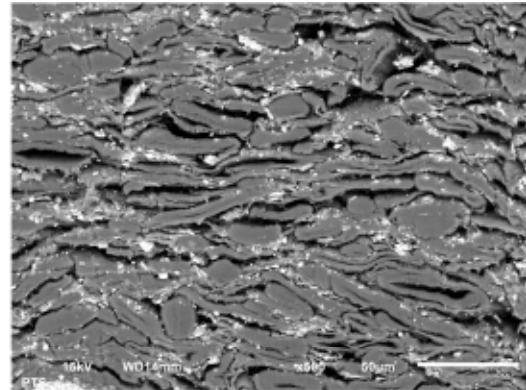
Abbildung 37: Eigenschaftsentwicklung der Presslinge in der Zellstoffmahlreihe

Die nachfolgende **Abbildung 37a** zeigt Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop in Z-Richtung im Standard-RK-Prüfblatt (links) und im gepressten Pellet (rechts) am Fluting-Faserstoff. In beiden Fällen ist eine starke Kompaktierung der Vliesstruktur zu erkennen. Bereiche mit nahezu geschlossenen Faserzwischenräumen und Bereiche mit noch offenen Faserzwischenräumen wechseln sich ab.



RK Prüfblatt

Blattdicke = 165 µm
mA = 100 g/m²
Dichte = 0,61 g/cm³



FiberEXPRESS Pressling

Blattdicke = 1200 µm
mA = 1000 g/m²
Dichte = 0,83 g/cm³

Abbildung 37a: REM-Aufnahmen der Presslinge des Fluting-Faserstoffes

Die intensive mechanische Entwässerung des Faserstoffes im Fiber-XPress führte zu signifikant höheren Trockengehalten des Faserstoffes im Vergleich zu industriellen Pressenpartien an der Papiermaschine. Im Maximum wurden 69 % (Fluting), 76 % (Deinkingstoff), 60 % (TMP) und 70 % (Zellstoff-Mahlreihe) Trockengehalt erzielt.

Die Vliesverdichtung (Enddichte) in den Pellets war um bis zu 43 % höher als in einem RK-Standardprüfblatt bzw. am Fertigpapier an einer Papiermaschine zur Herstellung von Fluting.

4.6.2 Fasermorphologie

Im Folgenden sind die Ergebnisse zur Charakterisierung der Fasermorphologie mittels FIBERLAB-Partikelanalysator zusammengestellt. Zur getrennten Bewertung der Effekte **Pressung** im FIBER-XPRESS (= mechanischer Effekt) und **Trocknung** (= thermischer Effekt) erfolgt die Darstellung in jeweils 2 Diagrammen.

Zur Bewertung der Wirkung des Nasspressens wird der Originalzustand der Faserstoffe nach einer einfachen Unterdruckentwässerung über einem Papierfilter mit dem Zustand der Fasern nach entsprechender intensiver Pressung im Fiber-XPress verglichen.

Zusätzlich wurde der Effekt der Faserstofftrocknung auf die Fasermorphologie untersucht. Der Trocknungseinfluss wird durch den Relativvergleich „Filterkuchen ungepresst, feucht und getrocknet“ bzw. „Pellet gepresst, feucht und getrocknet“ dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Trocknungsbedingungen von 95 °C beim Filterkuchen und 170 °C beim Pellet sind die Ergebnisse zur Trocknung nur eingeschränkt vergleichbar. Es lässt sich jedoch ableiten, in welchen Grenzen sich die Fasermorphologie durch eine Trocknung bei unterschiedlichen Temperaturen verändert und inwieweit eine Vorpressung des Faserstoffes in Kombination mit höherer Temperaturen (= Extrembedingungen bei der Papierherstellung) die Veränderung ggf. verstärkt.

Die **Abbildung 38** zeigt jeweils den Effekt der mechanischen Entwässerung, d.h. die Probe wurde nach der Pressung im noch feuchten Zustand wieder in Wasser aufgelöst und anschließend vermessen. In **Abbildung 39** wird der Trocknungseffekt bei unterschiedlichen Temperaturen mit anschließender Auflösung der getrockneten Proben in Wasser visualisiert.

Der Faserdurchmesser wurde durch die intensive Pressung im Fiber-XPress kaum verändert. Der Einfluss der Zellstoffmahlung auf den Faserdurchmesser war ebenfalls gering.

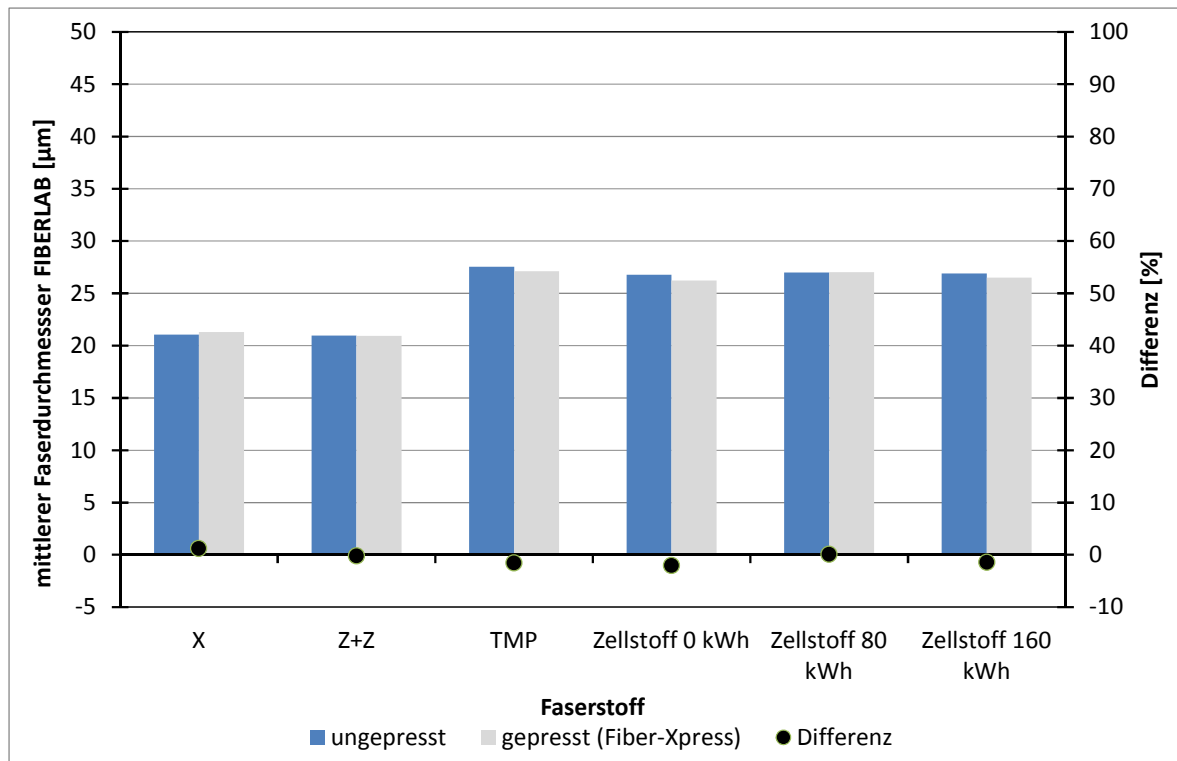


Abbildung 38: Veränderung der Faserlänge während des Nasspress-Vorganges (ohne Trocknung)

Bei der herkömmlichen Fasertrocknung bei 95 °C ohne Verpressung wurde der Faserdurchmesser durchweg leicht reduziert, d.h. die Faser schrumpfte irreversibel in Querrichtung.

Bei holzhaltigen Fasern im TMP, beim grafischen Altpapier (Z+Z) und beim höher gemahlten Zellstoff wurde nach der Trocknung bei 170 °C ein erhöhter Faserdurchmesser festgestellt.

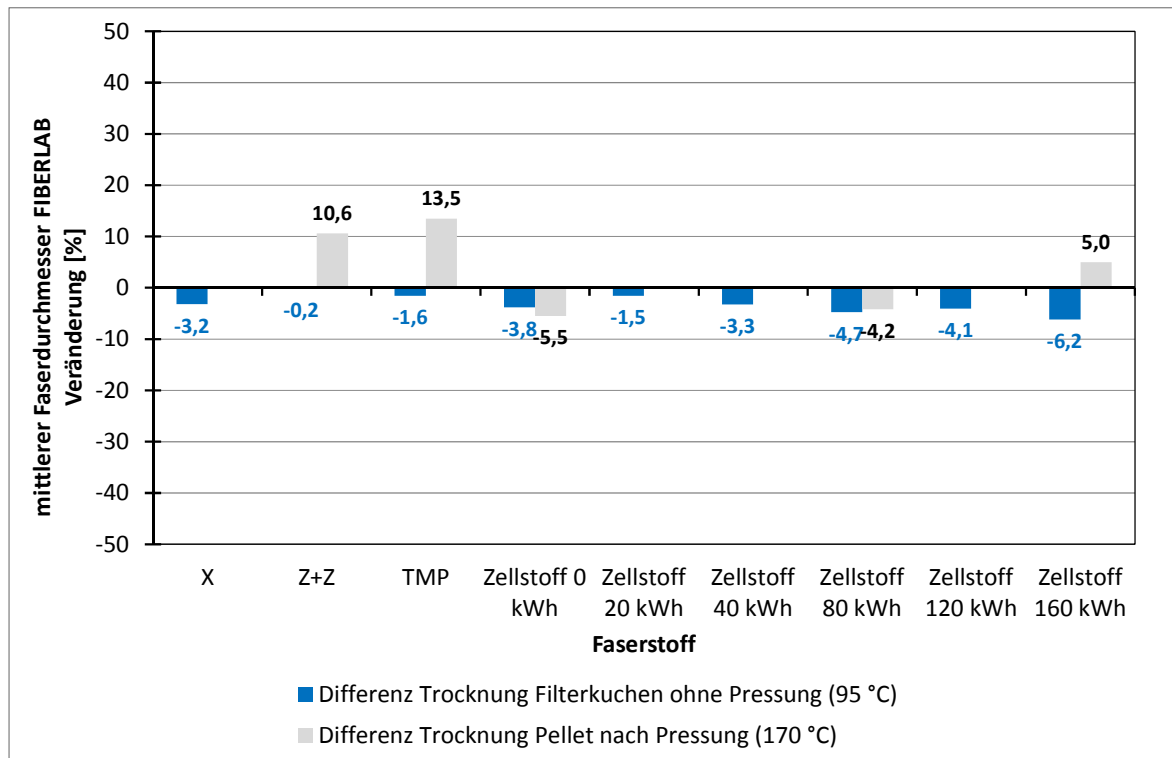


Abbildung 39: Veränderung der Faserlänge während der Trocknung

Der Fasercurl, d.h. die Abweichung von der ideal geraden Faserausrichtung, war als Folge der Nasspressung nur beim ungemahlten Zellstoff signifikant erhöht. Hier erfolgte auch die stärkste Verdichtung des Faservlieses nach dem Pressvorgang im Vergleich zu den anderen Proben aus der Zellstoffmahlreihe.

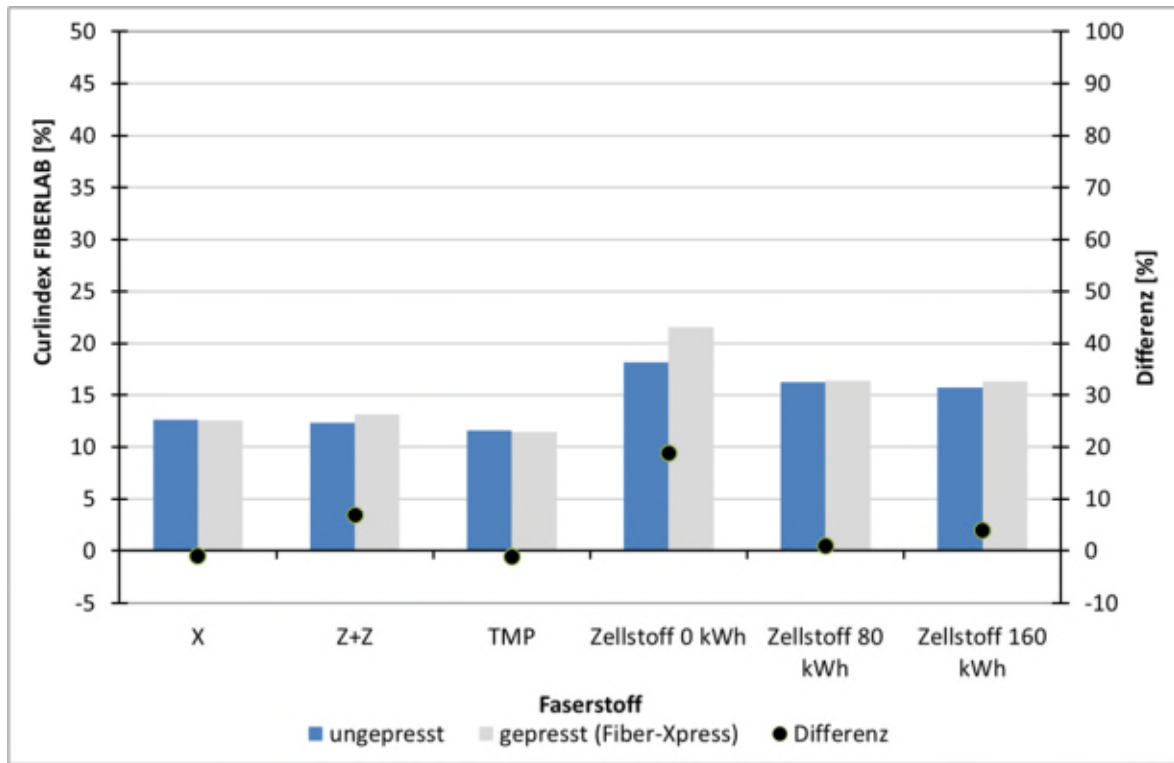


Abbildung 40: Veränderung des Curl-Indexes während des Nasspress-Vorganges (ohne Trocknung)

Der Fasercurl wurde durch die Trocknung der Pellets bei 170 °C beim TMP und bei 2 Zellstoffmustern etwas erhöht. Vermutlich erfolgte eine über den Faserumfang und die Faserlänge ungleichmäßig verteilte Faserschrumpfung, so dass es insgesamt zu einer verstärkten irreversiblen Faserbiegung nach der Hochtemperaturtrocknung kam. Bei der konventionellen Fasertrocknung bei 95 °C wurde der CURL-Index in allen Fällen verringert.

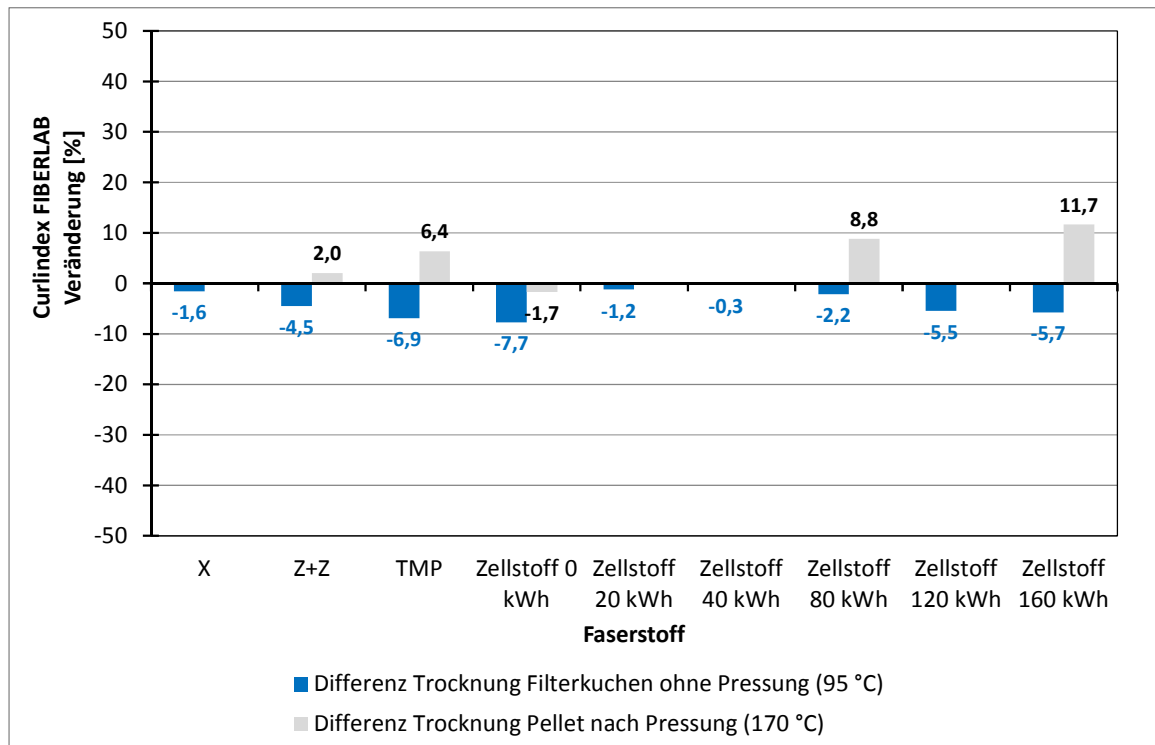


Abbildung 41: Veränderung des Curl-Indexes während der Trocknung

Die Fibrillierung der Faseroberfläche (Ausbildung „Faserpelz“) war beim ungemahlene Zellstoff nach der Pressung stark reduziert. An dieser Probe lag allerdings auch das Ausgangsniveau der Fibrillierung mit Abstand am niedrigsten, so dass die absolute Veränderung im Fibrillierungsindex auch nur bei ca. 1 % lag. Man könnte den Effekt dahingehend interpretieren, dass am Anfang der Mahlung die Fibrillen weniger stark (durchschnittlich geringerer Winkel, geringere Anzahl) von der Faseroberfläche absteigen und somit durch die Pressung auch leichter wieder in Richtung Faseroberfläche zurück gedrückt werden können. Beim Fluting (X), Deinkingstoff (Z+Z) und TMP waren nur geringe Änderungen im Fibrillierungsindex sichtbar.

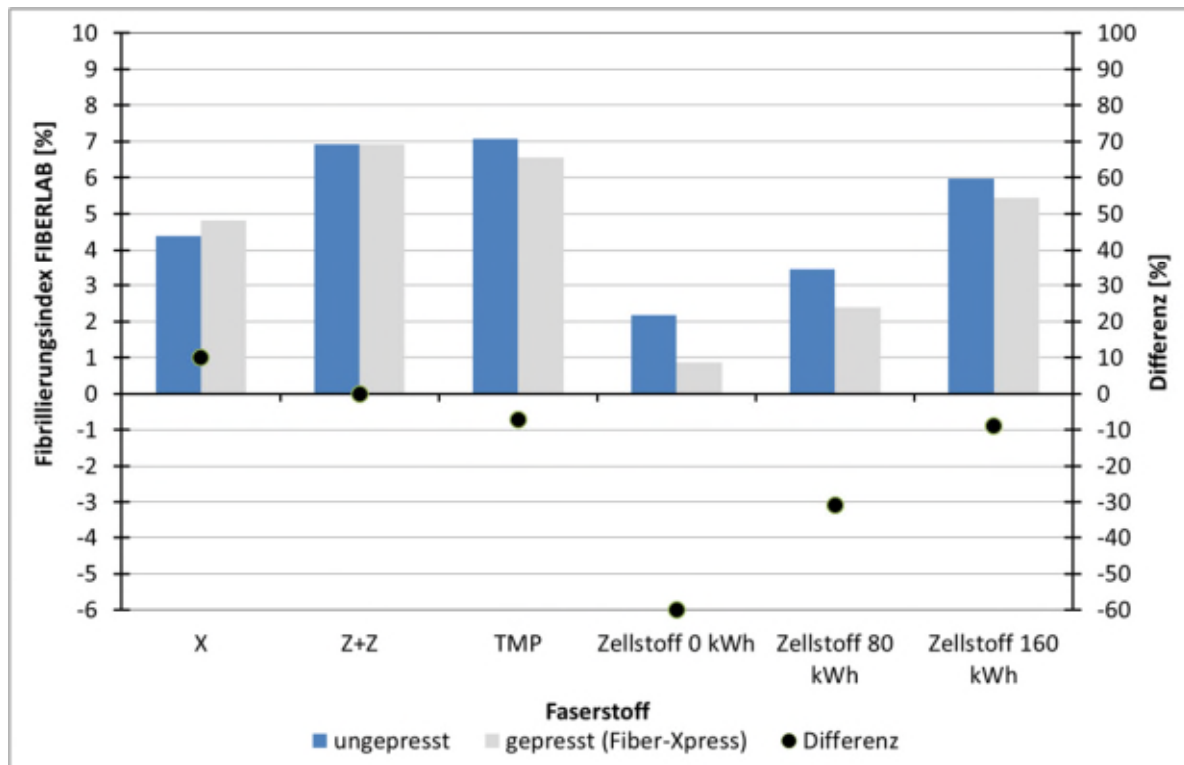


Abbildung 42: Veränderung des Fibrillierungs-Indexes während des Nasspress-Vorganges (ohne Trocknung)

Nach der Trocknung bei 95 °C wurde der Fibrillierungsindex vor allem bei den Zellstoffproben deutlich reduziert. Dies bedeutet, dass die Fibrillen entweder wieder stärker an die Faseroberfläche angelagert wurden oder dass die Fibrillen aufgrund ihrer Sprödigkeit infolge Trocknung bei der nachfolgenden Faserstoffdispergierung von der Faseroberfläche abgelöst wurden. Bei der Intensivtrocknung der Pellets bei 170 °C ergab sich kein eindeutiger tendenzieller Verlauf.

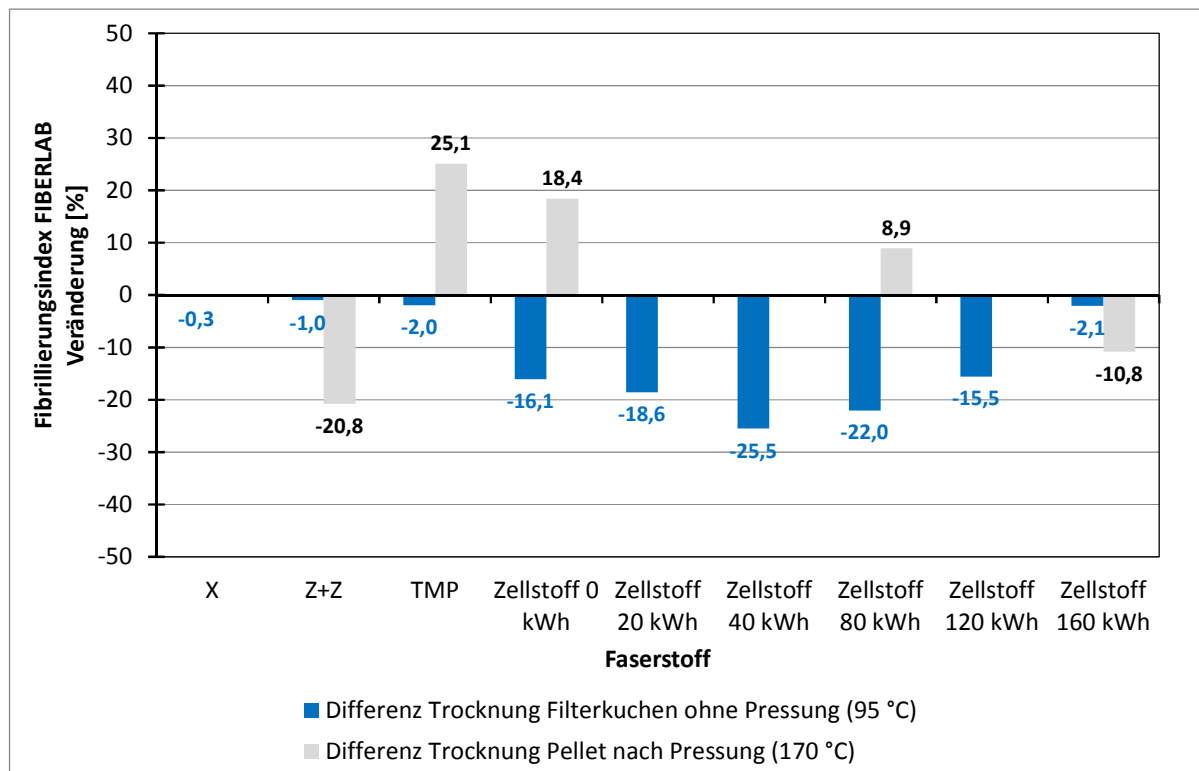


Abbildung 43: Veränderung des Fibrillierungs-Indexes während der Trocknung

Die Faserknickung wurde durch Pressung im Fiber-XPress beim ungemahlten Zellstoff stark erhöht. Hier lag auch die stärkste Verdichtung innerhalb der Zellstoffmahlreihe vor. Bei den üblicherweise eher steifen TMP-Fasern wurde ebenfalls eine deutliche Erhöhung der Anzahl der Faserknicke nach der intensiven Pressung gemessen.

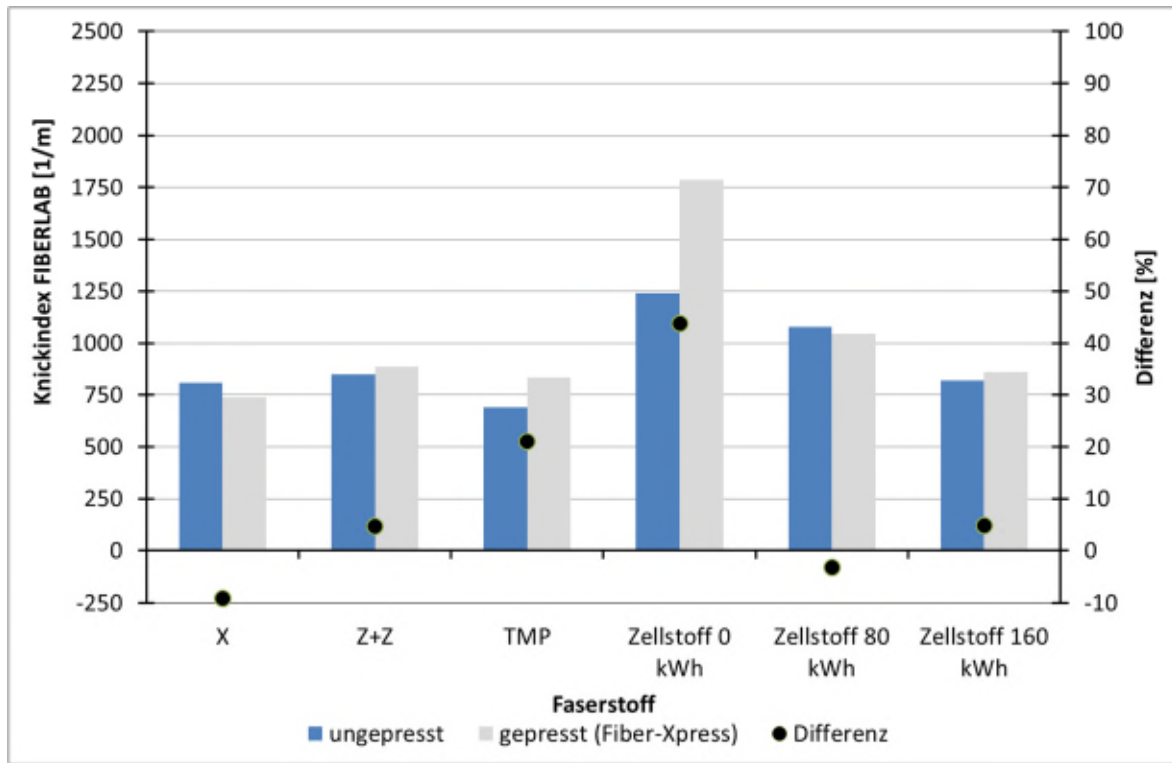


Abbildung 44: Veränderung der Faserknickung während des Nasspress-Vorganges (ohne Trocknung)

Bei den Veränderungen beim Knickindex in der Trocknung konnten keine eindeutigen allgemein gültigen Trends abgeleitet werden.

Beim Zellstoff wurde der Knickindex in der 95 °C-Trocknung bei niedrigen Entwässerungswiderständen erhöht, bei der 170 °C-Trocknung beim höchsten Entwässerungswiderstand. Die erhöhte Anzahl der Faserknicke beim TMP nach der Pressung wurde in der anschließenden Trocknung wieder teilweise kompensiert.

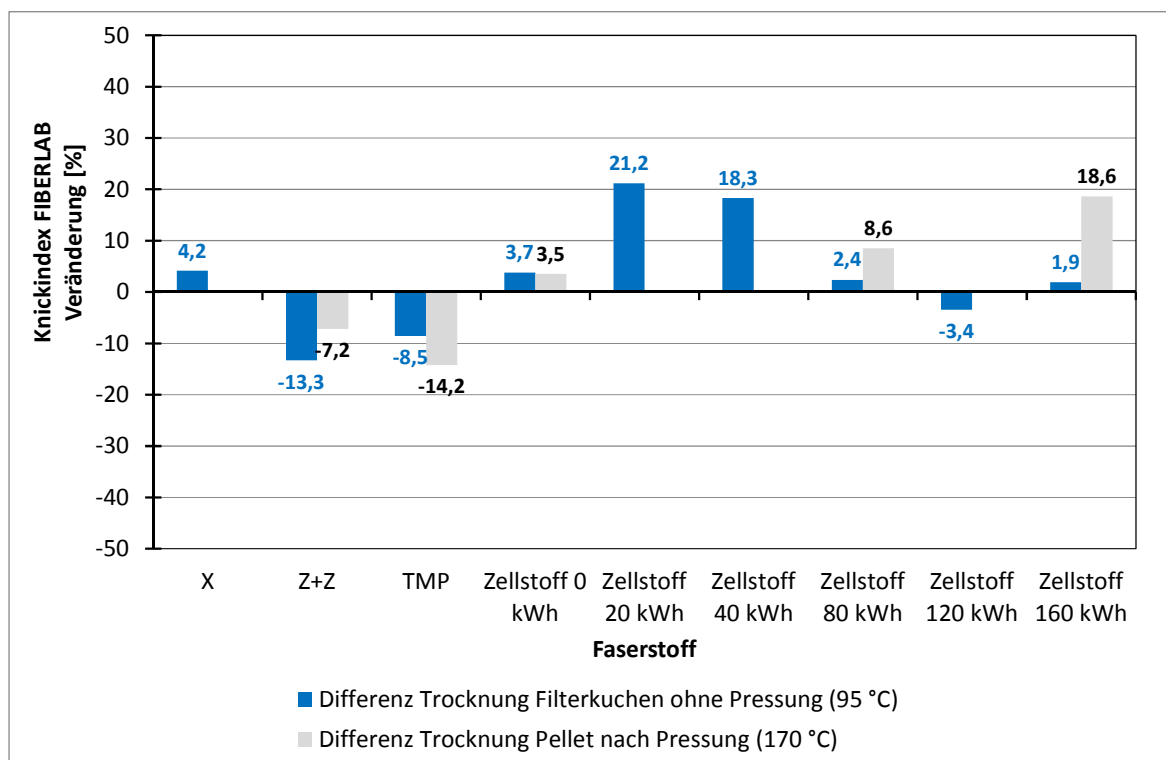


Abbildung 45: Veränderung der Faserknickung während der Trocknung

Die Fasermorphologie hinsichtlich Faserdurchmesser und Faserlänge wurde im Mittelwert von 6 untersuchten Faserstoffen (Fluting, Deinkingstoff, TMP, 3 Mahlpunkte Zellstoff mit 0; 80; 160 kWh/t Mahlenergie) nur wenig verändert. Die Abweichung von der Faserlängsausrichtung, gekennzeichnet durch Curl- und Knickindex wurde durch die intensive Pressung leicht erhöht. Demgegenüber reduzierte sich der Durchschnittswert beim Fibrillierungsindex. Die Streubreite der Ergebnisse an den 6 Faserstoffen war bei den Parametern Curl-, Fibrillierungs- und Knickindex relativ hoch.

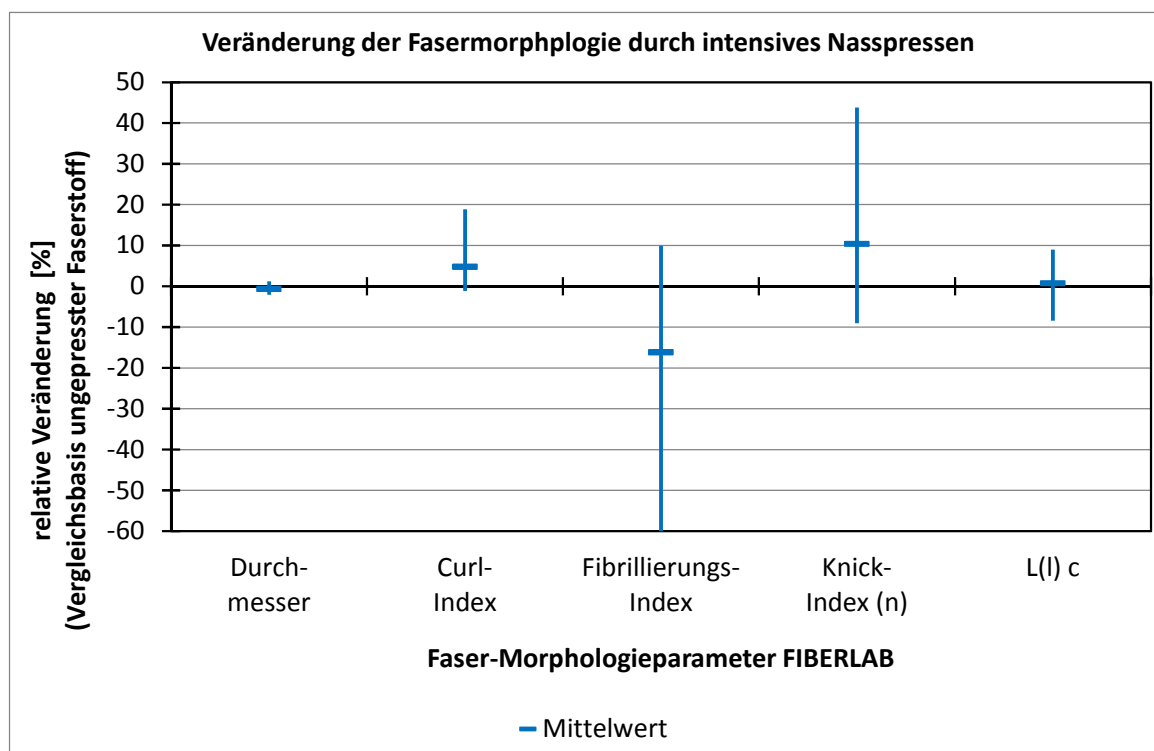


Abbildung 46: Änderungen in der Fasermorphologie, Zusammenfassung aller untersuchten Faserstoffe

Bei der Darstellung von Mittelwert, Streubreite und Einzelergebnissen im nachfolgenden Diagramm wird noch einmal deutlich, dass insbesondere die Stoffprobe ungemahlener Zellstoff zu den größten Abweichungen vom Mittelwert führte und somit auch signifikant zur Verbreiterung des Streubereiches der Ergebnisse beitrug.

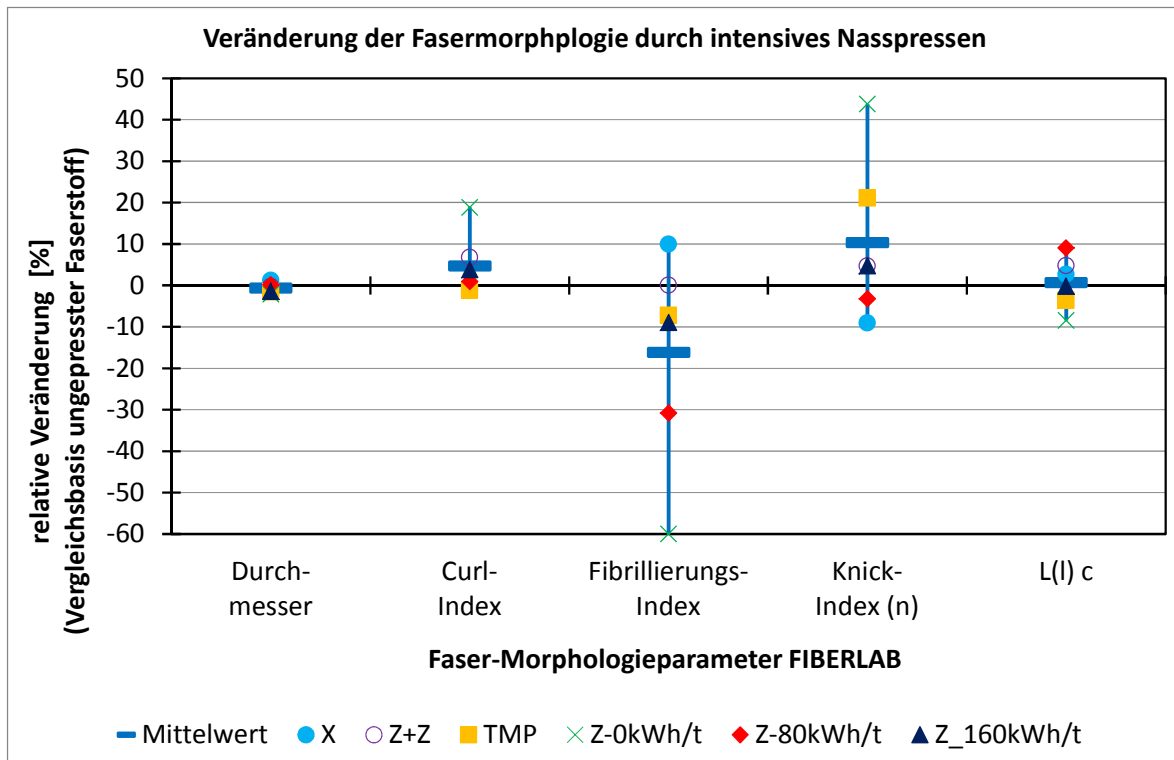


Abbildung 47: Änderungen in der Fasermorphologie, Zusammenfassung Mittelwerte und Einzelwerte

4.6.3 Wasserrückhaltevermögen

Über das Wasserrückhaltevermögen sollte bewertet werden, inwieweit eine intensive Faserverpressung mit dem Ziel maximaler Endtrockengehalte zu einer Veränderung der Wasseranlagerung beim Rückbefeuchten der Papierfasern führen kann.

Die Veränderungen im WRV im gepressten und getrockneten Zustand sind im folgenden Diagramm zusammengestellt. Die Ausgangsmaterialien lagen weitgehend auf einem einheitlichen WRV-Niveau von ca. 1,2 g/g. In der Zellstoffmahlreihe stieg das WRV in Richtung höherer Mahlintensität um bis zu 50 % an.

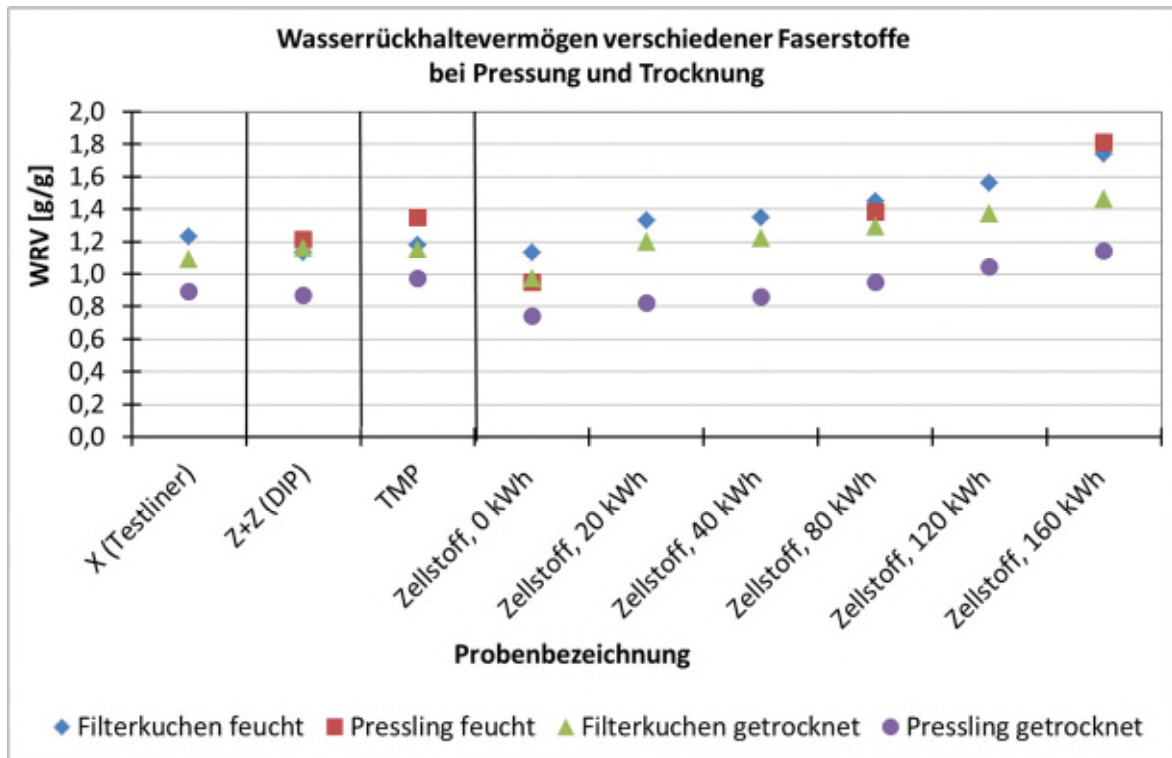


Abbildung 48: Einfluss von Pressung und Trocknung auf das Wasserrückhaltevermögen

Durch die intensive Nasspressung zur Erzeugung der Presslinge war im Mittelwert der untersuchten Proben keine Veränderung im WRV-Wert (rote Quadrate) feststellbar.

Beim ungemahlten Zellstoff wurde eine WRV-Reduzierung von 15 % gemessen und beim TMP ergab sich hingegen ein Anstieg von 15 %. Das folgende Diagramm zeigt die relative Veränderung des WRV-Wertes, der unverpresste und nicht getrocknete Ausgangsstoff wurde als 100%-Ausgangsniveau definiert.

Als Folge der Trocknung der unverpressten Proben bei einer Temperatur von 95 °C reduzierte sich der WRV-Wert im Mittel um 10 %. Durch die deutlich intensivere Trocknung der Pellets bei 170 °C wurde das WRV hier um ca. 30 % verringert.

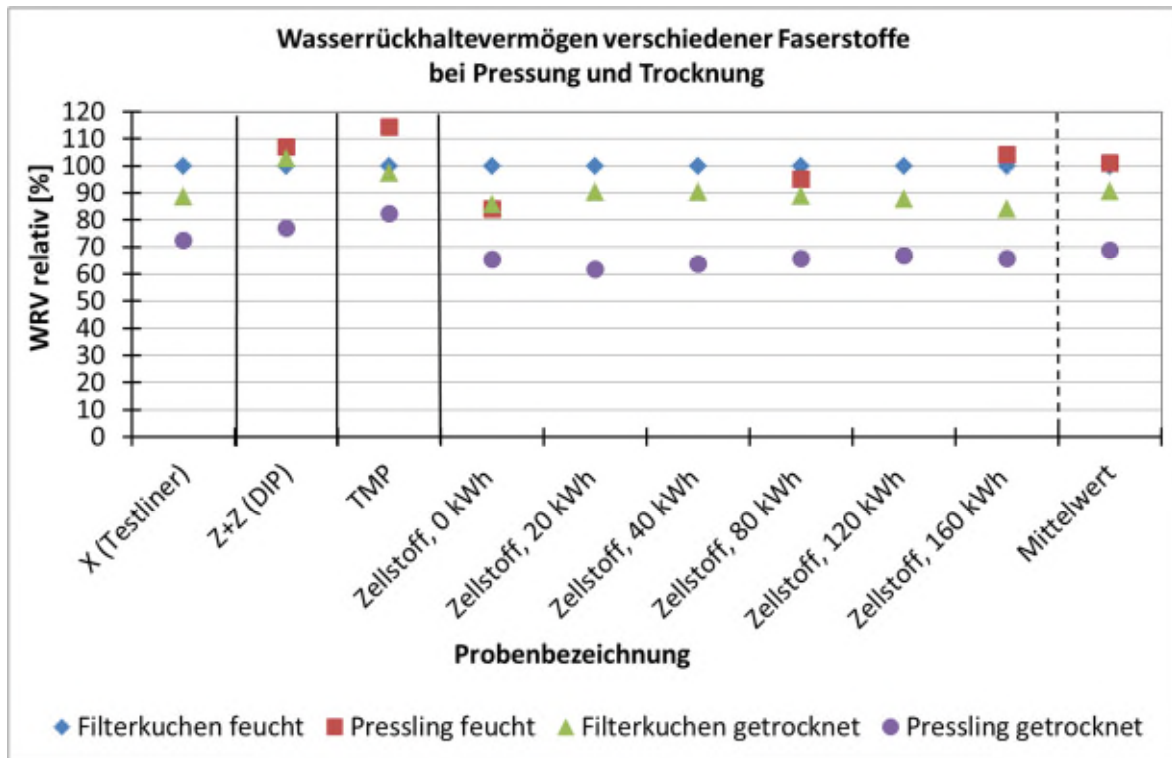


Abbildung 49: Einfluss von Pressung und Trocknung auf das Wasserrückhaltevermögen, Relativwerte

Die folgende **Abbildung 50** gibt nochmals einen zusammenfassenden Überblick zum Einfluss der Teilprozesse Pressung und Trocknung auf das Wasserrückhaltevermögen der Cellulosefasern.

Durch das Nasspressen erfolgte wie bereits gezeigt im Durchschnitt keine Reduzierung des Wasserrückhaltevermögens. Erst die Trocknung der Papierfasern bedingte eine mit zunehmender Temperatur verstärkte Abnahme des Wasserrückhaltevermögens.

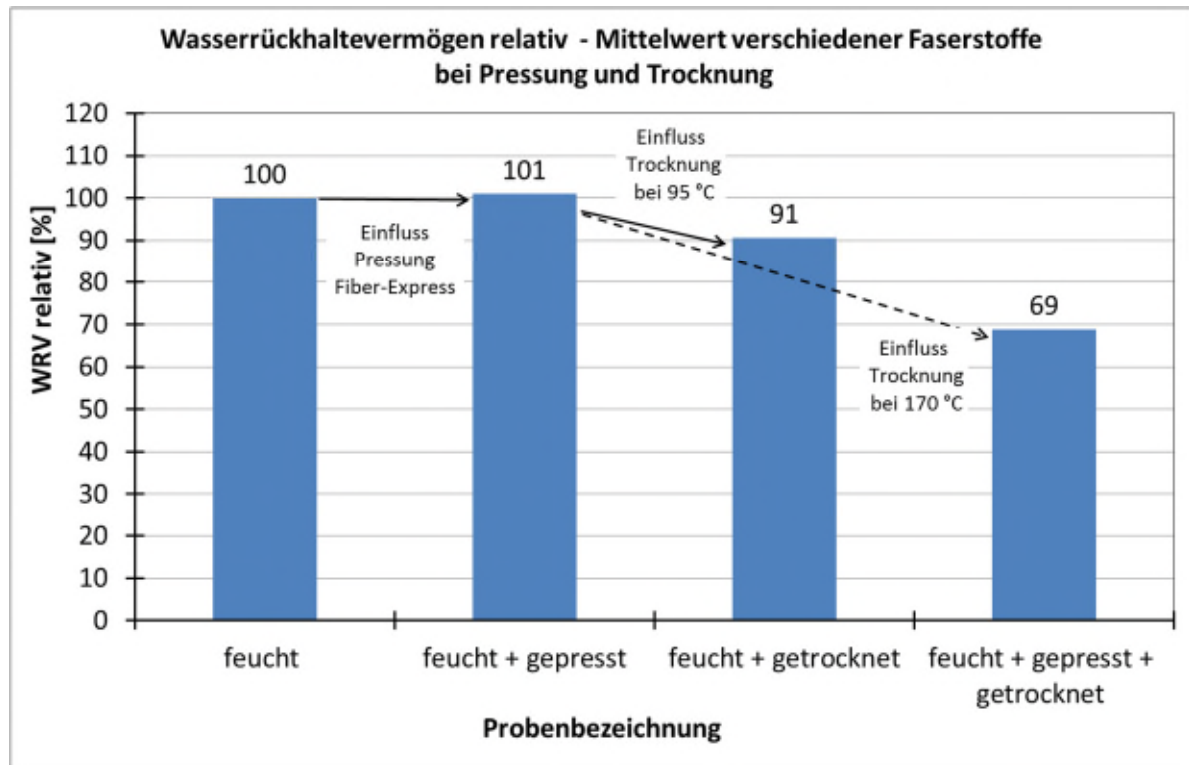


Abbildung 50: Zusammenfassung der Einflüsse auf das Wasserrückhaltevermögen

Aus dem Wasserrückhaltevermögen lässt sich ein korrespondierender Trockengehalt in der bei einer Zentrifugalbeschleunigung von 3000 g abzentrifugierten Faserstoffprobe berechnen. Dieser lag zwischen 36 und 45 %.

Bisher galt der über das WRV errechnete Trockengehalt als anzustrebendes Maximum bei der mechanischen Entwässerung von Faserstoffen der Papiererzeugung. Im Diagramm ist jedoch eindeutig und durchgehend für alle untersuchten Faserstoffe erkennbar, dass dieser Trockengehalt durch die intensive Nasspressung im Fiber-XPress deutlich übertroffen werden konnte.

Demnach stellt das WRV keineswegs die Grenze der maximal erreichbaren mechanischen Faserstoffentwässerung dar.

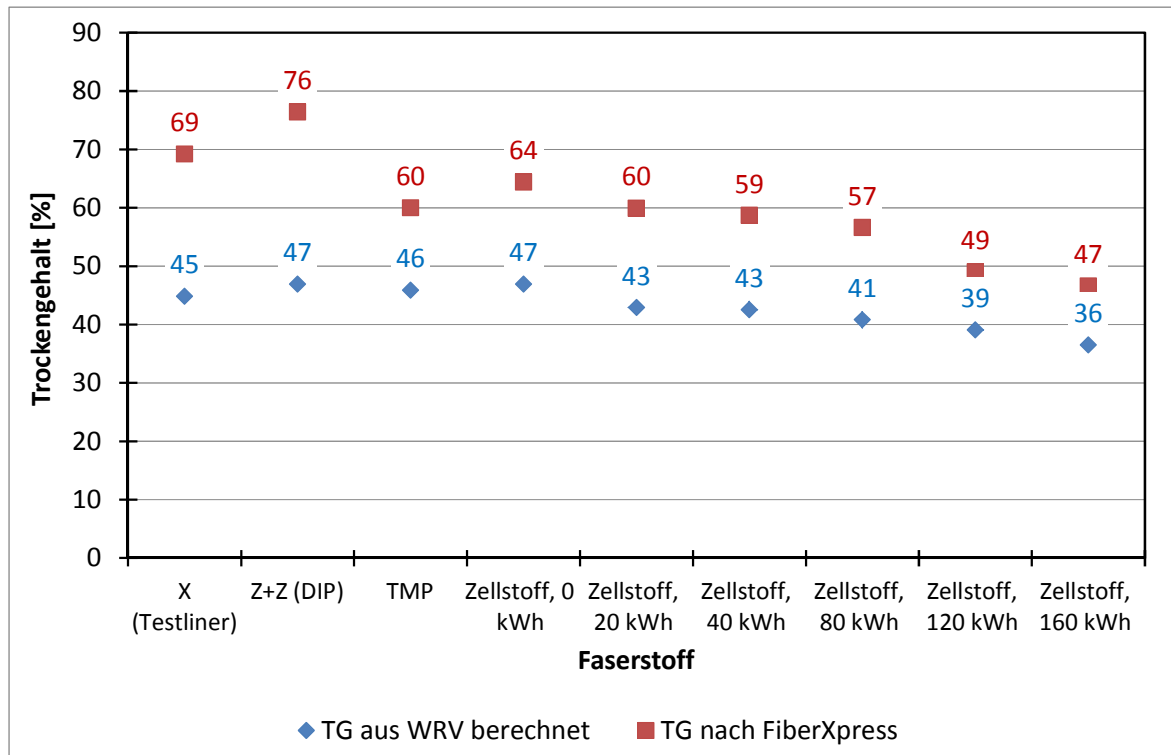


Abbildung 51: Vergleich der Trockengehalte nach WRV-Zentrifuge und nach Fiber-XPress

Das Wasserrückhaltevermögen wurde durch die Nasspressung nicht nachteilig beeinflusst. Die durch intensive Nasspressung erzielten Trockengehalte waren wesentlich höher als die aus dem Wasserrückhaltevermögen abgeleiteten Trockengehalte.

4.6.4 Ergebnisse der Differenzialkalorimetrie

Mit Hilfe der DSC-Messung können drei unterschiedlich im Faserstoff gebundene Wasserfraktionen getrennt ausgewiesen werden. Im Gegensatz zur WRV-Messung, die immer von einem vergleichsweise hohen Wassergehalt aus startet, kann bei der DSC-Messung an Proben jedes beliebigen Trockengehaltes gemessen werden.

Die DSC-Messung ist fallweise mit starken Schwankungen im Messergebnis mehrerer Einzelmessungen verbunden, so dass möglichst mindestens eine 3fach-Bestimmung an jeder Probe erfolgen sollte. Die dargestellten Ergebnisse erlauben eine überschlägige Abschätzung der infolge Nasspressen, Trocknung bzw. nachfolgender Wiederbefeuchtung abgetrennten bzw. wieder aufgenommenen Wasserfraktionen an den Cellulosefasern. Die folgenden drei Wasserfraktionen werden im Folgenden unterschieden:

- fw = freies Wasser in großen Poren der Faserwand und im Faserlumen

- fbw = freies gebundenes Wasser in kleinen Poren der Faserwand
- nfbw = gebundenes Wasser an der Celluloseoberfläche

In den **Abbildungen 52 bis 57** ist immer das ermittelte Wasserrückhaltevermögen und die drei Wasserfraktionen entsprechend der DSC-Messung gegenüber gestellt. Die drei Wasserfraktionen sind dabei entsprechend ihrer Entfernbarekeit gestapelt, d.h. die am schwersten entfernbare Wasserfraktion (nfbw) ist im Stapel unten dargestellt. In der Summe der drei Balkenabschnitte ergibt sich der jeweilige Gesamtwassergehalt in der zur DSC-Messung herangezogenen Probe.

4.6.4.1 Fluting

Im Ausgangszustand vor Pressung und Trocknung waren in der Probe 21 % nfbw, 38 % fbw und 76 % fw vorhanden, der addierte Gesamtwassergehalt der drei DSC-Fractionen entsprach in etwa dem Wasserrückhaltevermögen. In der Nasspressung im Fiber-Xpress wurde das in den großen Poren und im Lumen befindliche freie fw-Wasser um ca. 90 % reduziert, während das in den kleinen Poren gebundene fbw-Wasser ca. 60 % reduziert wurde. Das an die Celluloseoberfläche gebundene nfbw-Wasser blieb in der Nasspressung unverändert.

Es zeigte sich auch, dass mittels Fiberexpress auf mechanischem Wege eine signifikant stärkere Gesamtentwässerung erreicht wurde als mit der WRV-Zentrifuge (2. Balken von links = Pellet nach Fiberexpress).

Bei der Trocknung der Pellets wurden erwartungsgemäß nahezu alle Restwasseranteile entfernt.

Bei der Rückbefeuchtung der getrockneten Probe zeigte sich, dass der nfbw- -Wasseranteil wieder vollständig an die Celluloseoberfläche angelagert wurde. Bei dieser Probe war die eingebrachte Wassermenge bei der Wiederbefeuchtung etwas zu gering, so dass die Vollständigkeit der Rückanlagerung der nächsten Wasserfraktion fbw hier leider nicht bewertet werden konnte.

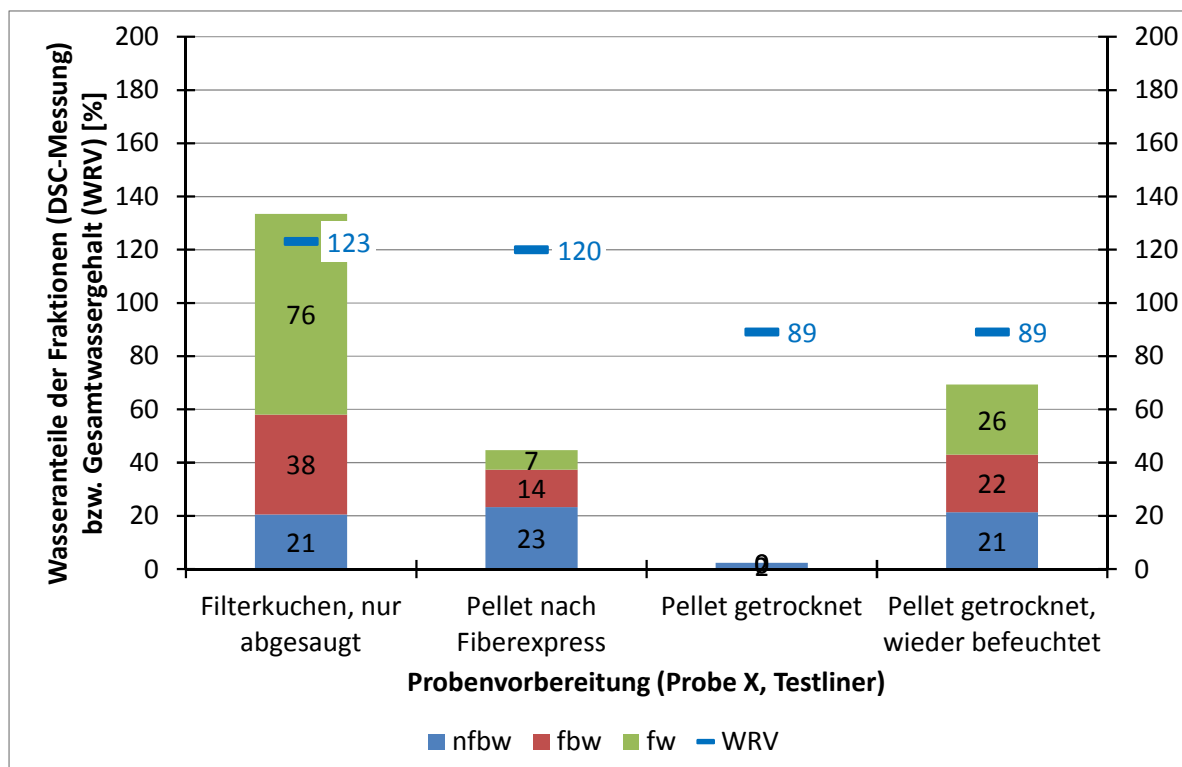


Abbildung 52: Einfluss von Pressung und Trocknung auf die Wasserfraktionen (DSC), Fluting

4.6.4.2 Zeitungen und Zeitschriften

An der Mischprobe aus je 50 % Zeitungen und Zeitschriften konnte ebenfalls gezeigt werden, dass mittels Fiber-XPRESS eine signifikant über das WRV hinausgehende Entwässerung möglich war. Sowohl die fw- als auch die fbw-Wasserfraktion wurden fast vollständig abgepresst. Bei der nfbw-Wasserfraktion hatte die Nasspressung wie im Fluting-Faserstoff keinerlei Wirkung.

Bei der Wiederbefeuchtung der gepressten und getrockneten Probe wurde eindeutig gezeigt, dass die Wasserfraktionen nfbw und fbw wieder vollständig an die Cellulose angelagert werden konnten. Demnach fand bei dieser Probe kein Verschließen der kleinen Poren in der Faserwand statt und auch die Celluloseoberfläche konnte wieder vollständig benetzt werden.

Daraus könnte man ableiten, dass die signifikante WRV-Reduzierung nach der Trocknung vor allem durch eine verminderte Wasseranlagerung der fw-Fraktion in den großen Poren der Faserwand und im Faserlumen verursacht wurde, da diese bei der Pellet-Trocknung teilweise irreversibel verschlossen wurden. Im Filterkuchen betrug der fw-Anteil am WRV ca. 65 %, beim getrockneten Filterkuchen jedoch nur noch 35 %.

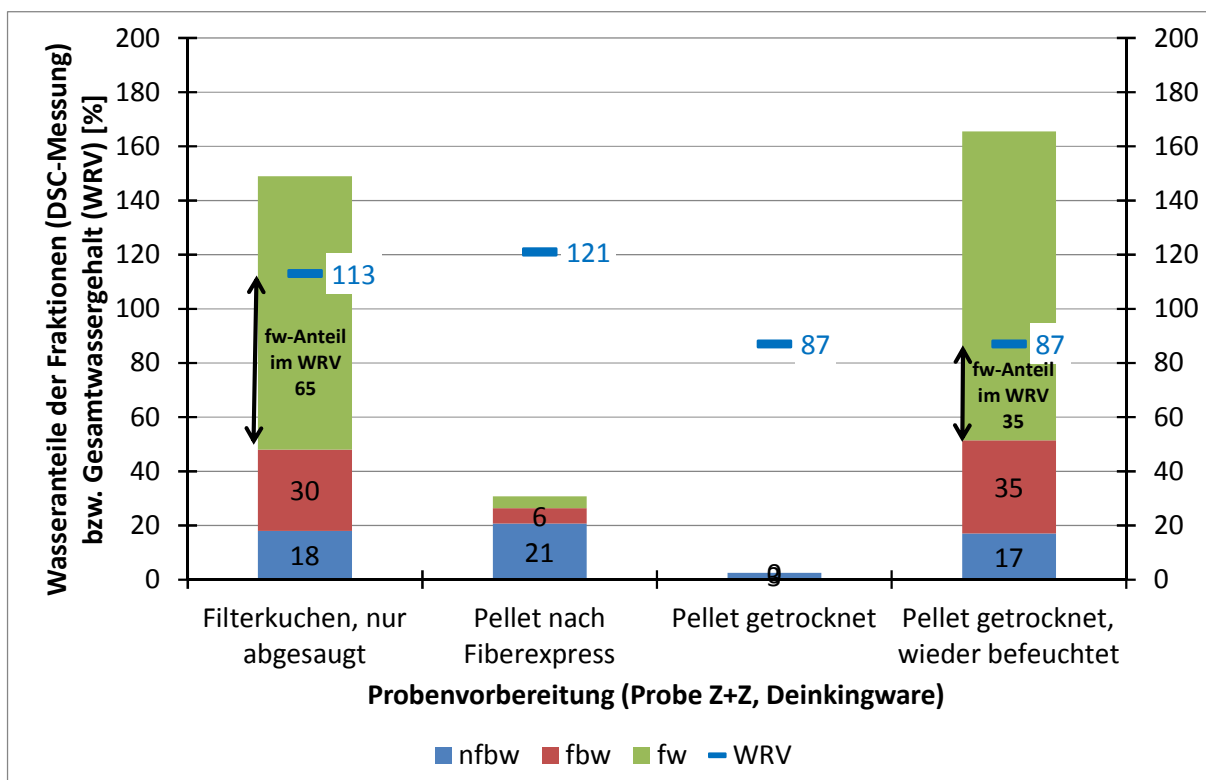


Abbildung 53: Einfluss von Pressung und Trocknung auf die Wasserfraktionen (DSC), Deinkingware

4.6.4.3 Zellstoffmahlreihe

Der ungemahlene Zellstoff konnte in der Nasspressung sehr stark entwässert werden. Das WRV wurde in der Nasspressung deutlich unterschritten. Wie beim Fluting- und Deinkingstoff wurden die beiden Wasserfraktionen fw und fbw signifikant reduziert, während die nfbw-Wasserfraktion unverändert blieb.

Der Balkenstapel ganz rechts ist eine zusätzliche Messung am komplett wieder aufgelösten Pellet. Die beiden Wasserfraktionen nfbw und fbw konnten nach der Pressung wieder vollständig an die Fasern ein- bzw. angelagert werden.

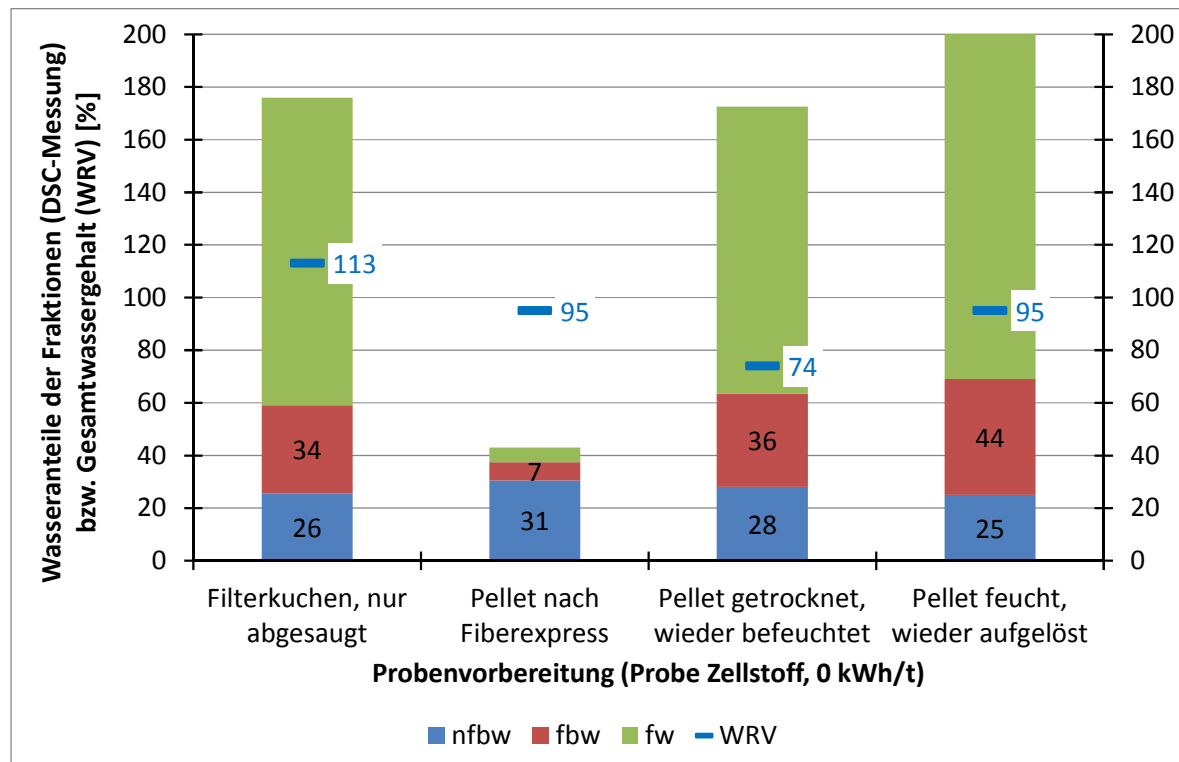


Abbildung 54: Einfluss von Pressung und Trocknung auf die Wasserfraktionen (DSC), Zellstoff 0 kWh/t

Die Ergebnisse am mit 40 kWh/t gemahlenen Zellstoff zeigten wieder die weitgehend vollständige Abpressung der Wasserfraktionen fw und fbw aus dem Pellet. Das nfbw-Wasser wurde nicht reduziert. Bei der Wiederbefeuchtung konnte eine komplette Wiederanlagerung der nfbw- und weitgehend auch der fbw-Wasserfraktion an die Celluloseoberfläche nachgewiesen werden.

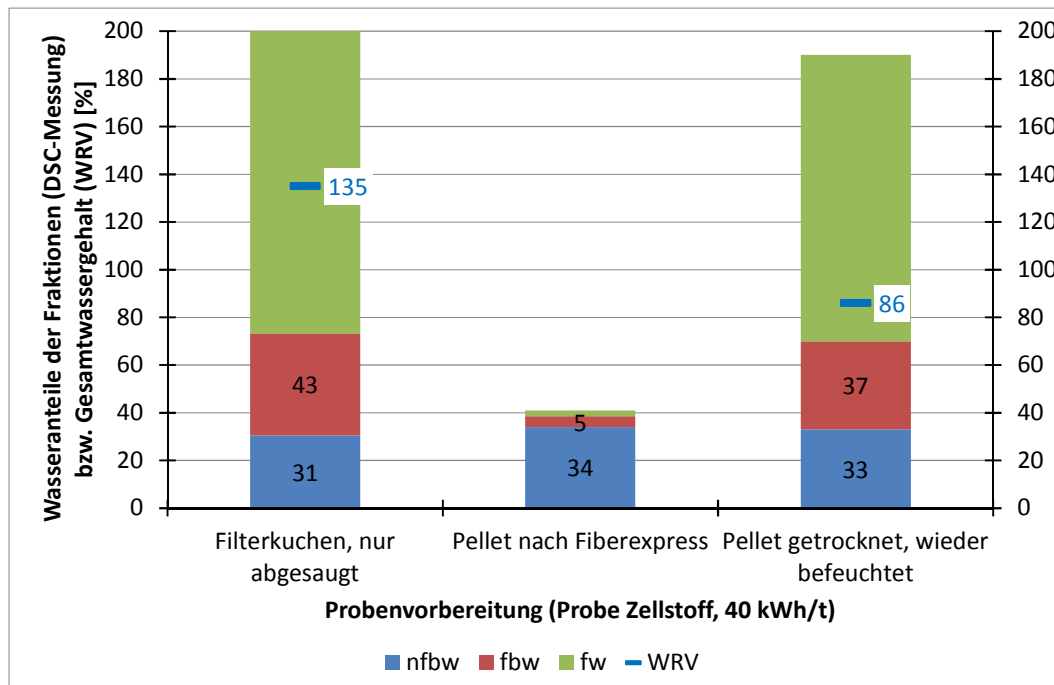


Abbildung 55: Einfluss von Pressung und Trocknung auf die Wasserfraktionen (DSC), Zellstoff 40 kWh/t

Bei den höher ausgemahlten Zellstoffen zeigte sich ein verändertes Entwässerungsverhalten in der Nasspressung mit dem Fiber-XPRESS. Die beiden Wasserfraktionen f_w (in den kleinen Poren der Faserwand) und $nfbw$ (an die Celluloseoberfläche gebunden) waren quantitativ deutlich größer als bei den gering gemahlten Zellstoffen. Mit zunehmender Mahlung kommt es demnach zu einer Aufweitung der Fibrillenstruktur in der Sekundärwand der Cellulosefaser, verbunden mit einer Erhöhung der Porenzahl und der für Wasser zugänglichen massespezifischen Celluloseoberfläche.

Lediglich das f_w -Wasser aus den Makroporen und dem Lumen konnte in der Nasspressung weitgehend entfernt werden. Das Wasser aus den Mikroporen (fbw) wurde relativ betrachtet nur noch zu etwa 50 % abgepresst. Es wurde auch Wasser von der Celluloseoberfläche ($nfbw$) teilweise reduziert. Betrachtet man jedoch die Messwerte am mit 160 kWh/t gemahlten Zellstoff, wo das $nfbw$ durch Pressung kaum reduziert wurde, so kann die beobachtete $nfbw$ -Reduzierung als Messwertausreißer bewertet werden.

Insgesamt war die im Pellet verbliebene Restwassermenge bei 120 kWh/t deutlich größer als bei den gering gemahlten Zellstoffen. Eine endgültige Bewertung der Wiederbefeuchtung ist anhand der Daten nicht möglich, da die eingebrachte Wassermenge etwas zu gering war. Die Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass ein Teil des $nfbw$ - und fbw -Wasser bei der Wiederbefeuchtung nach der Trocknung nicht wieder angelagert werden konnte.

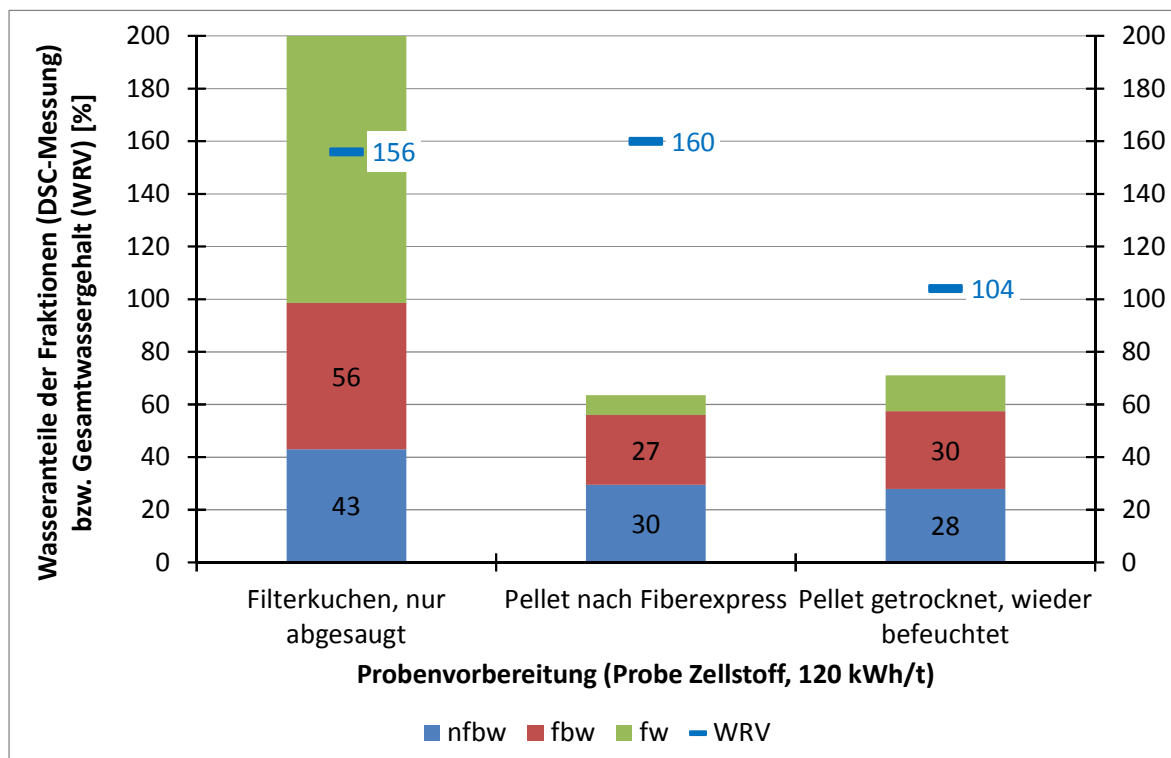


Abbildung 56: Einfluss von Pressung u. Trocknung auf die Wasserfraktionen (DSC), Zellstoff 120 kWh/t

Der mit 160 kWh/t gemahlene Zellstoff ließ sich wiederum deutlich schwerer im Fiber-XPRESS entwässern als alle vorherigen Zellstoffe der Mahlreihe. Dies ist am mit Abstand höchsten Gesamtwassergehalt nach dem Fiber-XPRESS (Summe der 3 Balkenanteile) im Pellet eindeutig sichtbar. Der Anteil an freiem Wasser wurde weitgehend, jedoch weniger stark reduziert als bei den geringer gemahlene Zellstoffen. Die fbw- und nfbw-Wasserfraktionen wurden zwar durch das Nasspressen reduziert, blieb jedoch auf einem deutlich erhöhten Niveau.

Die Ergebnisse zum Rückbefeuchtungsverhalten sind in ihrer Gesamtheit nicht plausibel. Zum Beispiel kann der nfbw-Wasseranteil im wieder aufgelösten feuchten Pellet (4. Balken von links) nicht geringer sein, als im Pellet nach Pressung (2. Balken von links). Die Ergebnisse der nfbw-Wasserfraktion nach der Trocknung weisen jedoch darauf hin, dass eine vollständige Rückbefeuchtung des stark gemahlene Zellstoffes nicht möglich war.

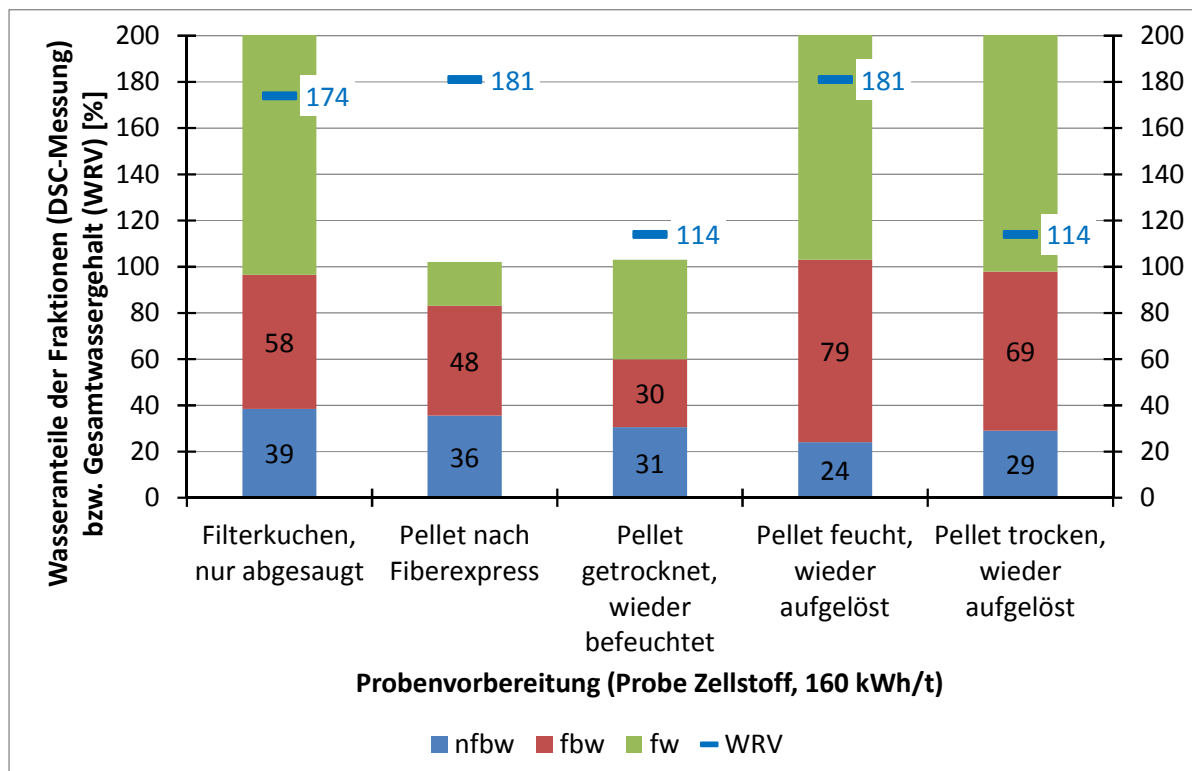


Abbildung 57: Einfluss von Pressung u. Trocknung auf die Wasserfraktionen (DSC), Zellstoff 160 kWh/t

Bei Betrachtung der Zellstoffmahlreihe in ihrer Gesamtheit (Ausgangsstoffe ohne Pressung, Summe der DSC-Wasserfraktionen = WRV-Gesamtwassergehalt) wurden die folgenden grundlegenden Zusammenhänge sichtbar:

- die nfbw-Wasserfraktion (an die Celluloseoberfläche gebunden) war stets die kleinste Wasserfraktion innerhalb des WRV
- mit zunehmender Mahlung stieg der Anteil aller 3 Wasserfraktionen kontinuierlich an
- die fbw-Wasserfraktion wies dabei den steilsten Anstieg auf, d.h. es wurde infolge der Mahlung überdurchschnittlich mehr Wasser in kleine Poren der Faserwand eingelagert

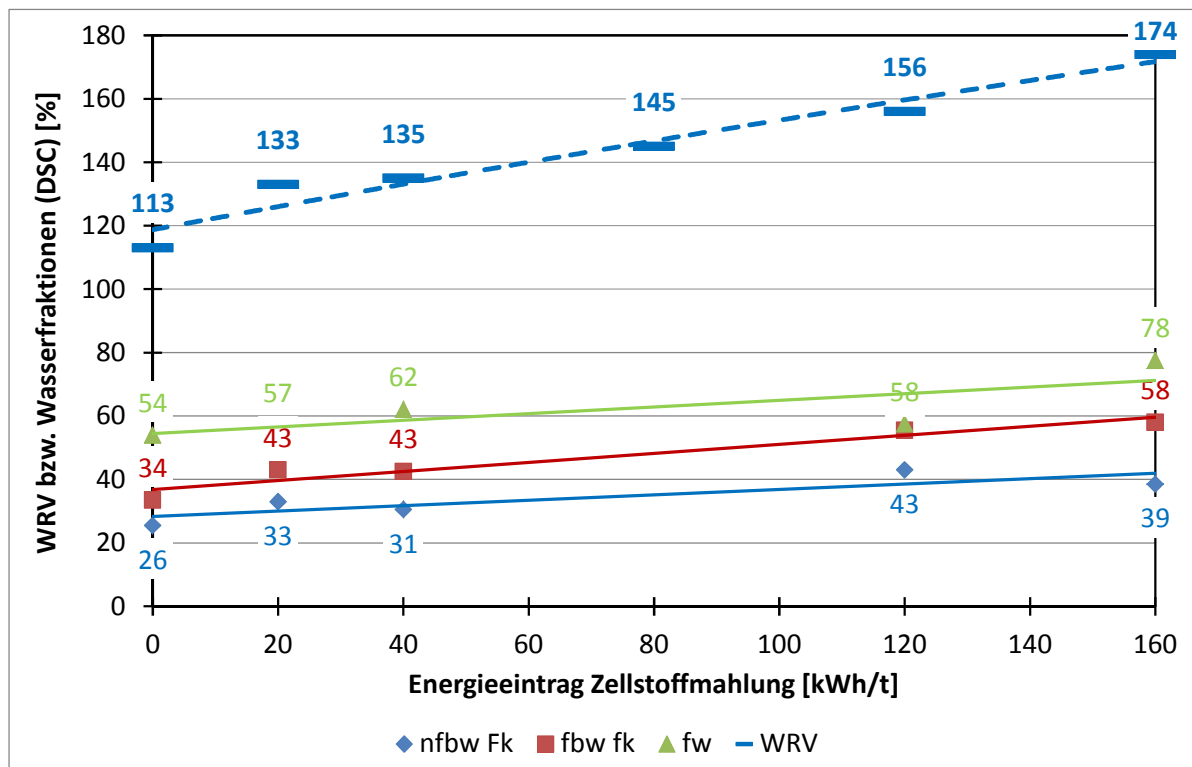


Abbildung 58: Einfluss von Pressung u. Trocknung auf die Wasserfraktionen (DSC), Zellstoffmahlreihe

Durch die Nasspressung wurden folgende Effekte sichtbar:

- die Entwässerung im Fiber-XPRESS war in jedem Fall deutlich intensiver als die Zentrifugalentwässerung bei 3000g in der WRV-Zentrifuge
- die Entwässerbarkeit des Zellstoffes durch Nasspressen reduzierte sich mit steigendem Entwässerungswiderstand signifikant
- vor allem die mechanische Entfernbarekeit der fbw-Wasserfraktion ging mit steigendem Entwässerungswiderstand deutlich zurück
- bei den gering ausgemahlten Zellstoffen konnte die vollständige Rückbefeuchtung der Fasern in der nfbw- und fbw-Wasserfraktion mittels DSC-Messungen in der nfbw- und fbw-Wasserfraktion gezeigt werden
- bei den höher gemahlten Zellstoffen reichen die bisher vorhandenen Ergebnisse für eine gesicherte Bewertung des Rückbefeuchtungsverhaltens nach der Pressung noch nicht aus

- die WRV-Reduzierung durch Trocknung ist vor allem durch eine reduzierte Wiederanlagerung der fw-Wasserfraktion bedingt, d.h. in der Trocknung werden vor allem die großen Poren der Faserwand und das Faserlumen irreversibel verschlossen

Die Ergebnisse der DSC-Messungen zeigten die Verschiebungen in den drei Wasserfraktionen in den unterschiedlichen Faserstoffen nach Pressung und Trocknung sehr detailliert.

Für eine mechanische Entwässerung des Faserstoffes besteht grundsätzlich ein deutlich über das herkömmliche WRV hinausreichendes Wirkpotenzial zur Trockengehaltssteigerung in der Pressenpartie der Papiermaschine.

Anhand der bisher vorhandenen DSC-Messungen konnte beim Fluting-, Deinkingstoff und bei den niedrig gemahlenen Zellstoffen die vollständige Rückbefeuchtung der nfbw- bzw. fbw-Wasserfraktionen nach Pressung und Trocknung abgeleitet werden.

Da das Wasserrückhaltevermögen als Summe der 3 Wasserfraktionen nach der Nasspressung weitgehend unverändert blieb, kann geschlussfolgert werden, dass auch eine mögliche Wiederanlagerung der 3. Wasserfraktion (fw) durch die der Naßpressung kaum beeinflusst wurde.

Insgesamt wurde das Wasseraufnahmevermögen der Faserstoffe durch die intensive mechanische Entwässerung im Fiber-XPRESS nicht nachteilig beeinflusst. Änderungen in der Rückbefeuchtung ergaben sich fallweise erst nach der Trocknung der Faserstoffe, wobei in den Versuchen extreme Trocknungstemperaturen von 170 °C zur Anwendung kamen.

4.6.4 Recyclingversuche am Substrat Zeitungen und Zeitschriften

Die vollständige Zerkleinerung der gepressten und getrockneten Pellets im Labormaßstab bis zur Stippenfreiheit erwies sich als schwierig. Aus diesem Grund wurden verschiedene Einweich- und Zerkleinerungsprozeduren untersucht, um ein bestmögliches Zerkleinerungsergebnis zu erhalten.

Versuche zur Pellet-Zerkleinerung mit einer Dispermatscheibe und einem speziellen Strömungsoptimierten Leitstrahlmischer waren nicht erfolgreich. Eine Zerkleinerung mittels Ultra-Turrax war für das Projekt nicht zielführend, da hier die Fasermorphologie wesentlich verändert und der Dispergierspalt zeitnah mit Faserstoff zugesetzt wird.

Zur Erzielung eines bestmöglichen und reproduzierbaren Zerkleinerungsergebnisses als Grundlage für die Recyclingversuche wurde die in der folgenden **Tabelle 7** aufgeführten Quell- und Zerkleinerungsprozeduren für die Partikel und Pellets untersucht. Für den angestrebten Vergleich des Recyclingverhaltens von Partikeln und gepressten Pellets muss letztendlich eine einheitliche Zerkleinerungsprozedur angewendet werden.

Tabelle 7: Vorversuche zu unterschiedlichen Zerfaserungsvarianten

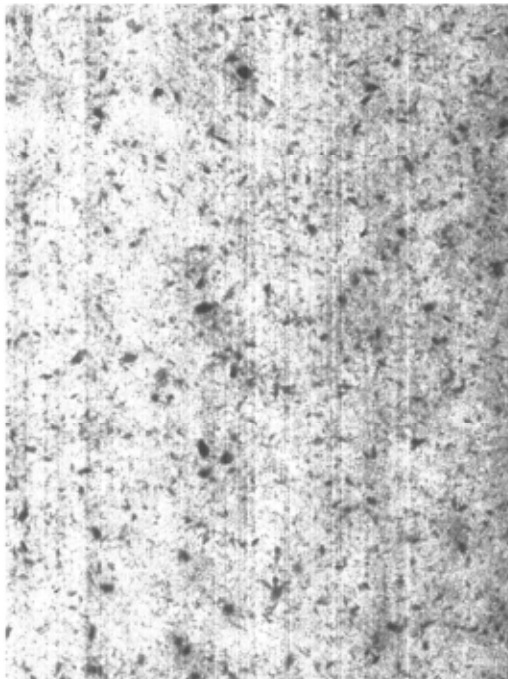
	Rohstoff	Vorbereitung	Zerfaserung	Fazit
Variante 1	Z+Z Partikel	Einweichen über Nacht - zerpfücken von Hand - Einweichen 4h	15min/Zyklus im Standard-Desintegrator	E-SR = 45, viele sichtbare Schmutzpunkte
Variante 2	Z+Z Partikel	Einweichen über Nacht - zerpfücken von Hand - Einweichen 4h	40+45 min Standard-Desintegrator vor Zyklus 1	E-SR = 65, nahezu keine sichtbaren Schmutzpunkte
Variante 3	Z+Z Pellets	Einweichen über Nacht - zerpfücken von Hand - Einweichen 4h	40+45min Standard-Desintegrator vor Zyklus 1	E-SR = 56, sichtbare Reststippen im Stoff (3,93% in Zyklus 4), trotz Sortierung Stoff über Brecht Holl mit 0,7 mm o Stippen im Blatt sichtbar
Variante 4	Z+Z Pellets	Einweichen über Nacht - zerpfücken von hand - Einweichen 4 h - zerfasern 40 min Standard-Desintegrator - Einweichen 3,5d	45min Standard-Desintegrator	E-SR = 55, sichtbare Reststippen im Stoff

Bei den auf 2x2 cm zugeschnittenen Partikeln zeigte sich ein signifikanter Effekt der Zerfaserungsdauer auf den Entwässerungswiderstand und die Partikelgrößenverteilung. Nach der längeren Zerfaserungszeit lag der Entwässerungswiderstand deutlich höher und die nach 15 min noch deutlich sichtbaren Schmutzpunkte waren nach insgesamt 85 min Zerfaserungsdauer stark reduziert.

Bei den Pellets wurde nur mit sehr langen Zerfaserungszeiten gearbeitet, da in weiteren Vorversuchen an anderen Faserstoffen nach 45 min eine weitgehende Stippenfreiheit erreicht wurde. Es zeigte sich jedoch, dass sowohl die Variation der Quellzeit (bis zu 4d) als auch eine extrem lange Zerfaserungszeit im Standard-Desintegrator von insgesamt 85 min nicht zur vollständigen Stippenfreiheit des Faserstoffes führte. Nach der Zerfaserung waren noch 3,93 % Reststippen in der Stoffprobe vorhanden (gemessen mit der 0,7 mm BRECHT-HOLL Lochplatte).

In einer visuellen Blattinspektion zeigten sich weitere Stippen im Blatt, die aufgrund ihrer geringen Abmessung bei der BRECHT-HOLL Stippenbestimmung nicht erfasst wurden. Die folgende **Abbildung 59** verdeutlicht den Reststippengehalt im Blatt mit und ohne BRECHT-HOLL-Sortierung.

Original (Stippengehalt 3,9 %)



nach Brecht-Holl-Sortierung
(0,7 mm Lochplatte)

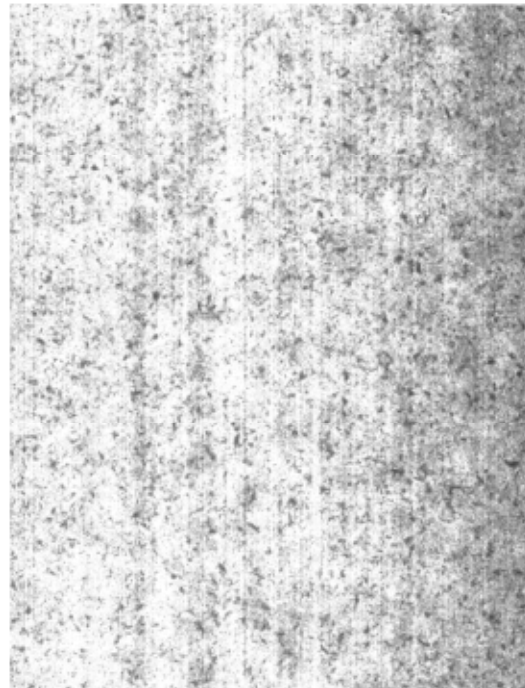


Abbildung 59: Visualisierung der Stippen im Faserstoff nach Auflösung der Pellets

Im Verlauf des 4maligen Recyclingkreislaufes im Labor (ohne Kreislaufwasserführung) wurde die Probe bei jeder erneuten Blattbildung zunehmend entascht. Der Aschegehalt hat sich sowohl bei den Partikeln als auch bei den Pellets in etwa halbiert.

Das Wasserrückhaltevermögen hat sich bei beiden Mustern im Verlauf des Recyclings nicht verändert. Die infolge Trocknung zu erwartende Reduzierung des WRV wurde durch die signifikante Abtrennung der Füllstoffe kompensiert. Das WRV-Niveau der Pellets lag etwas höher als bei den Partikeln, d.h. durch die Pressung wurde kein negativer Einfluss auf das WRV sichtbar.

Der Entwässerungswiderstand im Zyklus 1 war bei den Partikeln höher. Ursache dafür waren die Reststippen im Stoff nach der Pelletzerfaserung, die hier zu einer Herabsetzung des SR-Wertes führten. Am Ende des Recyclingzyklusses lagen die SR-Werte bei Partikeln und Pellets auf einem nahezu gleichen Niveau von 35 – 38 SR. Dabei wurde der Faserstoff nach dem 4. Zyklus der Pellets über den BRECHT-Holl-Fraktionator nachsortiert.

Bei der Faserlänge war eine gute Übereinstimmung der Proben und keine wesentliche Veränderung im Recyclingverlauf zu erkennen.

Tabelle 8: Eigenschaftsveränderung der Faserstoffe im Recyclingszyklus

	WRV [g/g]	E -SR	mittlere Faserlänge [mm]	Asche [%]
Z+Z/Partikel, Zyklus1	0,94	65	1,20	23,1
Z+Z/Partikel, Zyklus4	0,98	35	1,16	12,0
Z+Z/Pellets, Zyklus1	1,06	55	1,14	23,2
Z+Z/Pellets, Zyklus4 (nachsortiert Brecht-Holl)	1,02	38	1,14	10,8

Bei den unverpressten Partikeln aus Deinkingware blieb das Niveau des Tensile-Indexes nach dem 4maligen Recycling konstant, der TEAR-Index stieg deutlich an. Bei beiden wesentlichen Papiereigenschaften wurde der sich auf die Papierfestigkeiten normalerweise negativ auswirkende Effekt der Fasererhornung durch den starken Füllstoffaustrag überkompensiert.

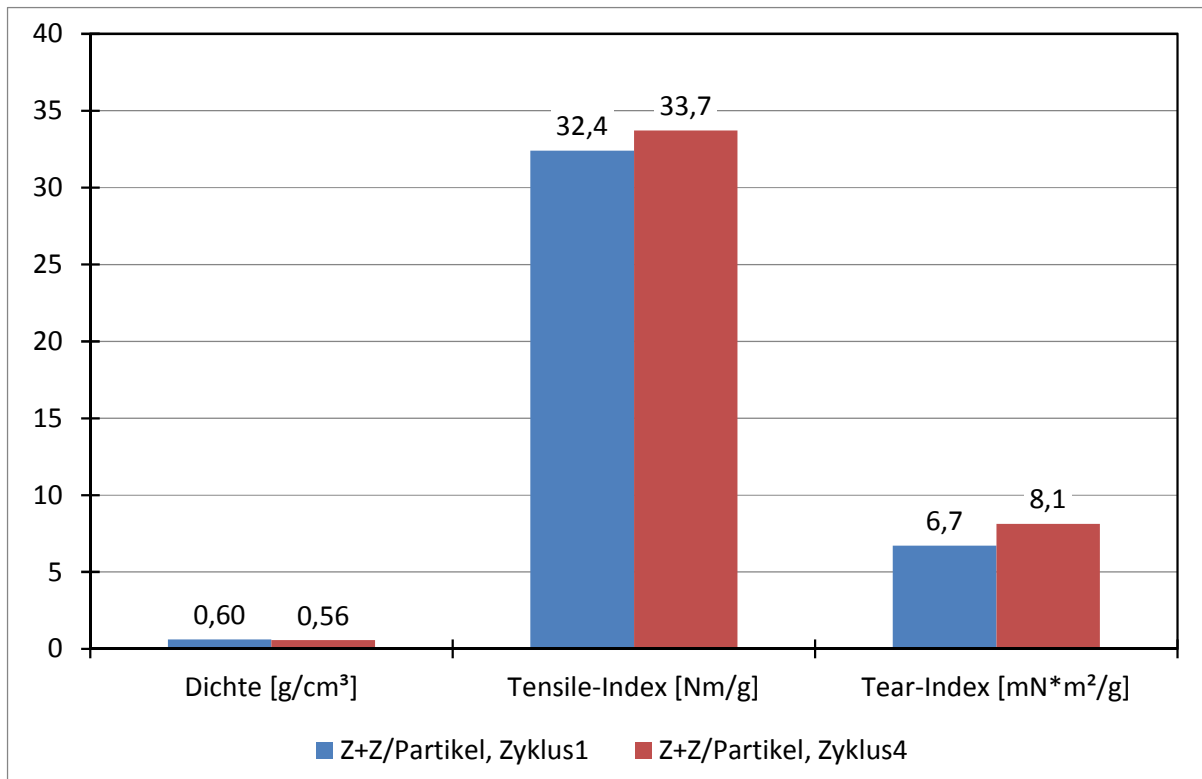


Abbildung 60: Verhalten des ungespressten Faserstoffes im Recyclingzyklus

Bei der papiertechnologischen Bewertung der aus den Pellets gebildeten Prüfblätter zeugte sich deutlich das Manko des Reststippengehaltes nach der Zerkleinerung. Das Ausgangsniveau beider Papierfestigkeiten lag deutlich tiefer als bei den Prüfblättern aus den zugeschnittenen Partikeln. Der Anstieg beim Tensile-Index im Zyklus 4 wurde durch die Abtrennung der großen Stippen erzielt.

Da sich bei den Pellet-Proben die Effekte des unterschiedlichen Reststippengehaltes und der signifikanten Ascheabtrennung überlagerten, kann eine mögliche Auswirkung des mehrfach-Recyclings auf die Papiereigenschaften hier nicht seriös abgeschätzt werden. Dazu wären insbesondere weitere Untersuchungen zur Zerkleinerung der Pellets erforderlich, um ein homogenes Ausgangsmaterial bereit zu stellen.

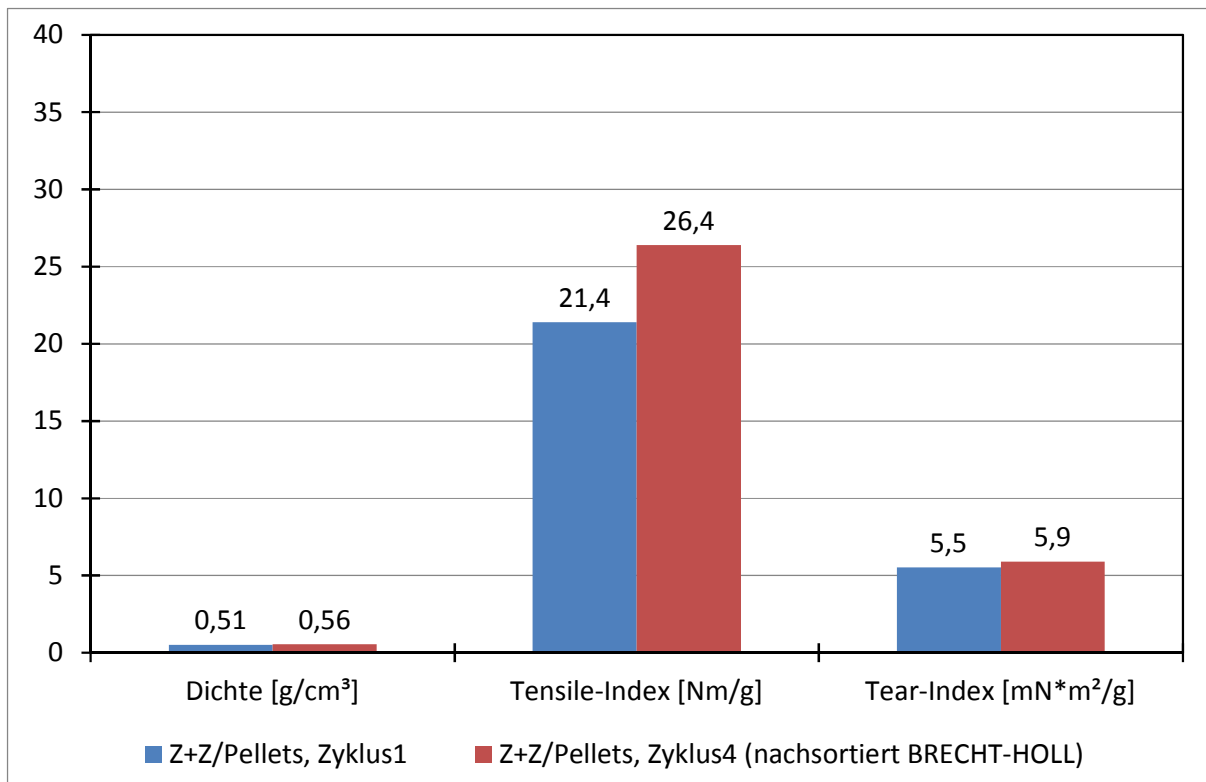


Abbildung 61: Verhalten des gepressten Faserstoffes im Recyclingzyklus

Das Verhalten der gepressten Pellets im mehrfachen Recyclingzyklus war aufgrund der unvollständigen Zerkleinerbarkeit der Pellets im Labormaßstab nur eingeschränkt möglich.

An der Fasermorphologie und an den im Detail untersuchten Wasserfraktionen an der Probe Z+Z wurden infolge Nasspressen keine wesentlichen Beeinträchtigungen festgestellt. Daher sollte auch bei den resultierenden Papiereigenschaften keine wesentliche Änderung zu erwarten sein.

4.7 Verfahrenstechnische Randbedingungen für ein neues Pressenkonzept

In Abschnitt 2.2.2 zeigt das Beispiel für Zeitungsdruckpapier, dass ein Pressimpuls von 90 kPas notwendig ist, um mit einer Tandem-Nipociflexpresse einen Trockengehalt von 50 % zu erreichen.

Der Pressimpuls berechnet sich eigentlich zu:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (10)$$

Entsprechend der Gleichung (10) wird er von der Software des FiberXPress auch numerisch integriert. In der Praxis ist es schwierig, eine Funktion $p(t)$ zuverlässig anzugeben. Aus diesem Grund idealisiert man den Druckverlauf zu einem Rechteck, dessen Flächeninhalt durch die Linienkraft und die Verweilzeit im Nip definiert wird. Der Pressimpuls berechnet sich dann näherungsweise:

$$I = \frac{F_L}{v_{pm}} \quad (11)$$

Dabei bedeutet:

v_{pm}Papiermaschinengeschwindigkeit.

Für die Daten aus Abschnitt 2.2.2 bedeutet dies, dass die Linienkraft bei insgesamt 2250 kN/m liegt:

$$F_L = I \cdot v_{pm} = 90 \frac{kNs}{m^2} \cdot 1500 \frac{m}{\min \cdot 60 \frac{s}{\min}} = 2250 \frac{kN}{m} \quad (12)$$

Unter der Annahme, dass die Nipbreite für die im genannten Abschnitt zweimal 0,3 m, also 0,6 m, beträgt, ergibt sich für den Pressdruck:

$$p = \frac{F_L}{b_{Nip}} = \frac{2250 \frac{kN}{m}}{0,6m} = 3750 kPa \quad (13)$$

Der Pressimpuls, bei dem die Permeabilitätskonstanten aus **Tabelle 4** ermittelt wurden, lag bei allen Substraten bei rund 10 MPas. Für die in Abschnitt 2.2.2 genannten Verhältnisse würde dies folgende Linienkraft erfordern:

$$F_L = I \cdot v_{pm} = 10000 \frac{kNs}{m^2} \cdot 1500 \frac{m}{\min \cdot 60 \frac{s}{\min}} = 250000 \frac{kN}{m} \quad (14)$$

Theoretisch wäre es auch möglich, den Pressimpuls dadurch einzustellen, indem man die Papiermaschine mit niedriger Geschwindigkeit betreibt und die Linienkraft konstant hält. Das sähe dann so aus:

$$v_{pm} = \frac{F_L}{I} = \frac{2250 \frac{kN}{m}}{10000 kPas} = 13,5 \frac{m}{\min} \quad (15)$$

Insgesamt muß man feststellen, dass zwischen dem heutigen Stand der Technik und den physikalischen Möglichkeiten der rein mechanischen Entweässerung hinsichtlich des Preßimpulses eine Diskrepanz in der Größenordnung des Faktors 100 besteht. Das klingt zunächst bitter. Wenn man aber versucht, heute bereits existierende Potentiale zu erschließen, dann ist folgendes Szenario denkbar: Man begibt sich in das Gebiet der Spezialpapiere mit hoher Wertschöpfung. Dort wären in vielen Fällen Papiermaschinengeschwindigkeiten von 500 m/min durchaus akzeptabel. Damit reduziert sich die Diskrepanz auf den Faktor 30. Investiert man jetzt einigen konstruktiven Aufwand, könnte man die Niplänge um den Faktor 5 steigern. Dies ist z.B. für Condebeltpressen bereits jetzt schon übertroffen. Dann bliebe der Faktor 6 bei der Linienkraft. Stabilitätsgründe der Konstruktion sprechen sicher nicht dagegen, ihn zu realisieren. Abdichtungsprobleme bei einer 1:1 Kopie der Condebeltlösung, übersieht der Autor (als Theoretiker) selbstverständlich nicht. Aber einen Versuch wäre es wert, nach Lösungen für verlängerte Preßzonen zu suchen, als heute üblich. Für die Bespannung müßten auch Anpassungen gefunden werden, wobei die Flächenpressung nicht unbedingt wesentlich zunehmen müßte. Die Verweilzeit im verlängerten Nip würde aber hohe Anforderungen an das Rücksprungvermögen der Filze (falls es sie bei einer Zukunftstechnologie denn überhaupt noch gibt) stellen.

4.8 Betrachtungen zur energetischen Effizienz und Einsparpotenziale

Bei der Berechnung des Energiebedarfs bei der Trocknung des Papiers kam die Gleichung (4) zur Anwendung. Dabei ist es schwierig, die Wärmekapazität von Papier festzulegen. Diese hängt von der Art des Faserstoffs und vom Füllstoffanteil und dessen Art ab. Einen mittleren Wert stellt der in **Tabelle 9** angegebene Wert dar. Er gilt für Zellstoff (Böck, 1993). Die Gleichung (4) berücksichtigt die Erwärmung des Papiers von einer Ausgangstemperatur von 40 °C auf die Siedetemperatur bei 1 bar. Es wird nur die theoretisch notwendige Wärmemenge berücksichtigt ohne jegliche Umwandlungsverluste. Auf der anderen Seite der Bilanz wird auch nicht berücksichtigt, dass neuartige Pressenkonstruktionen im Vergleich zur Referenz möglicherweise höhere Antriebsenergien benötigen. Es besteht die Hoffnung, dass

beide Unschärfen in den Daten, die je für sich genommen in der gleichen Richtung wirken, sich kompensieren.

Tabelle 9: Randbedingungen für die Berechnung der Energieeinsparung

Randbedingungen		
Daten		
Wärmekapazität Wasser	kJ/(kg K)	4,187
Wärmekapazität Papier	kJ/(kg K)	1,319
Verdampfungswärme	kJ/kg	2258
Bahntemperatur	°C	40

Die Berechnung der zu entfernenden Wassermenge erfolgt nach Gleichung (16):

$$\Delta m_{\text{Wasser}} = \frac{T_{GA} - T_{GE}}{T_{GA} T_{GE}} m_P \quad (16)$$

Dabei bedeuten:

Δm_{Wasser}durch thermische Trocknung zu entfernendes Wasser

TG....Trockengehalt

Indices:

A....Auslauf

E....Einlauf

Tabelle 10: Wärmebedarf zur Trocknung von 1 kg Papier in Abhängigkeit vom Einlauftrockengehalt in die Trockenpartie

Wärmebedarf						
Trockengehalt Einlauf	0,5000	0,5500	0,6000	0,6500	0,7000	0,7500
Trockengehalt Auslauf	0,9600	0,9600	0,9600	0,9600	0,9600	0,9600
kg/kg Papier						
Wassermenge	0,9583	0,7765	0,6250	0,4968	0,3869	0,2917
Wärmebedarf kJ/kg	2483,80917	2027,58735	1647,4025	1325,70763	1049,96917	810,995833

Abbildung 62 ist eine graphische Darstellung der massespezifischen Wärmemenge, die zur Trocknung notwendig ist, in Abhängigkeit vom Einlauftrockengehalt in die Trockenpartie. Dies ermöglicht bei Bedarf Interpolationen.

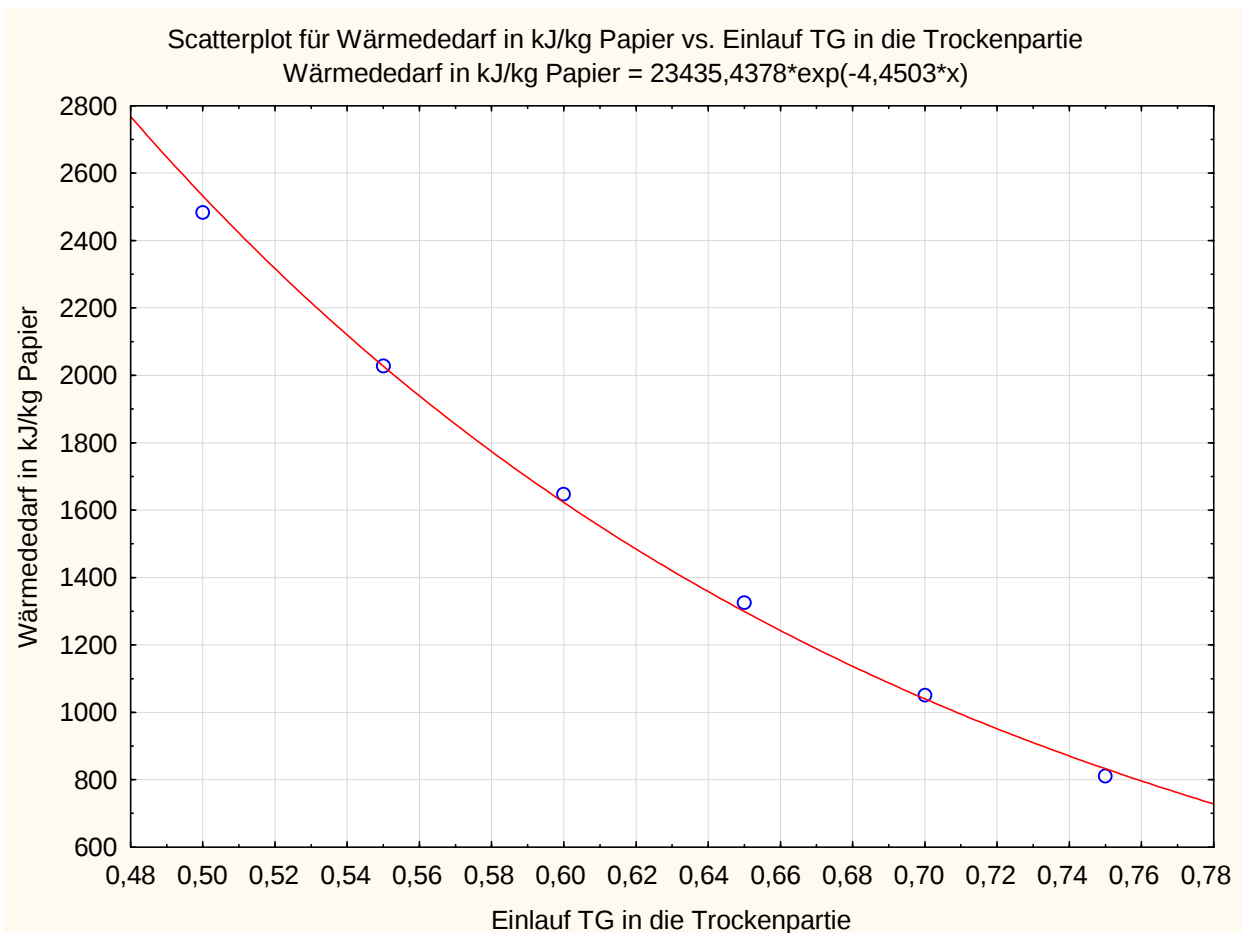


Abbildung 62: Massespezifischer Wärmebedarf für die Papiertrocknung in Abhängigkeit vom Einlauftrockengehalt in die Trockenpartie

Abbildung 63 zeigt das prozentuale Einsparpotenzial für die höheren Eingangstrockengehalte. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen konnten sicher um absolut 10% höhere Trockengehalte als die in Abschnitt 2.2.2 genannten Referenzen erzielt werden. Damit ergeben sich Einsparungen an thermischer Energie in Größenordnung von 30% bis 33% durch die Verbesserung des Nasspressvorgangs. Der Sprung von 55% Eingangstrockengehalt in die Trockenpartie auf 65% spart 702 kJ/kg Papier. Hochgerechnet auf eine Erzeugungsmenge von 22,535 Mio. t im Jahr 2014 (Statistik des VDP) würde dies 15817 TJ ergeben. Die nachfolgende **Tabelle 11** zeigt den CO₂-Ausstoß für Heizzwecke.

Tabelle 11: CO₂-Ausstoß für Heizzwecke

	Einheit	CO ₂ -Ausstoß in kg	Quelle
Heizen		mit Vorkette	
Heizöl	1kWh	0,32	CO ₂ -Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger – IWU
Erdgas	1kWh	0,25	CO ₂ -Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger – IWU
Steinkohle	1kWh	0,44	CO ₂ -Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger – IWU
Braunkohle	1kWh	0,45	CO ₂ -Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger – IWU
Fernwärme -GUD-KRAFTWERK	1kWh	0,11	CO ₂ -Bilanz für die Stadt Köln – Teilbereich Energie
Heizenergieverbrauch (D)	KWh/m ²	170	Heizspiegel 2013
Heizenergie Gas, Öl, FW (Köln)	KWh/m ²	140	CO ₂ -Bilanz für die Stadt Köln – Teilbereich Energie

Quelle: <http://www.koeln-spargt-co2.de/sites/default/files/Emissionsfaktoren.pdf>

Geht man von dem günstigen Fall aus, dass auch die thermische Energie zur Papiertrocknung mit Hilfe einer Kraft-Wärmekopplung (GUD-Kraftwerk) erzeugt wird, dann beträgt die Minderung der CO₂-Emissionen 2,9 Mio. t jährlich beim Erzeugen von nur Wärmeenergie etwa das Doppelte. Das sind 0,3% bzw. 0,6% der derzeitigen CO₂-Emissionen der BRD (953 Mio. t in 2013). Die nachfolgende **Abbildung 63** läßt erkennen, dass das Einsparpotential mit zunehmendem Trockengehalt verflacht und der Grenzwert etwa bei 80% liegen dürfte. Dies ist jedoch weit entfernt von den derzeitigen Möglichkeiten der rein mechanischen Entwässerung. Ein solches Potenzial könnte jedoch durch Synergieeffekte einer kombinierten thermisch/mechanischen Entwässerung erreicht werden (Preßtrocknung, Impulstrocknung).

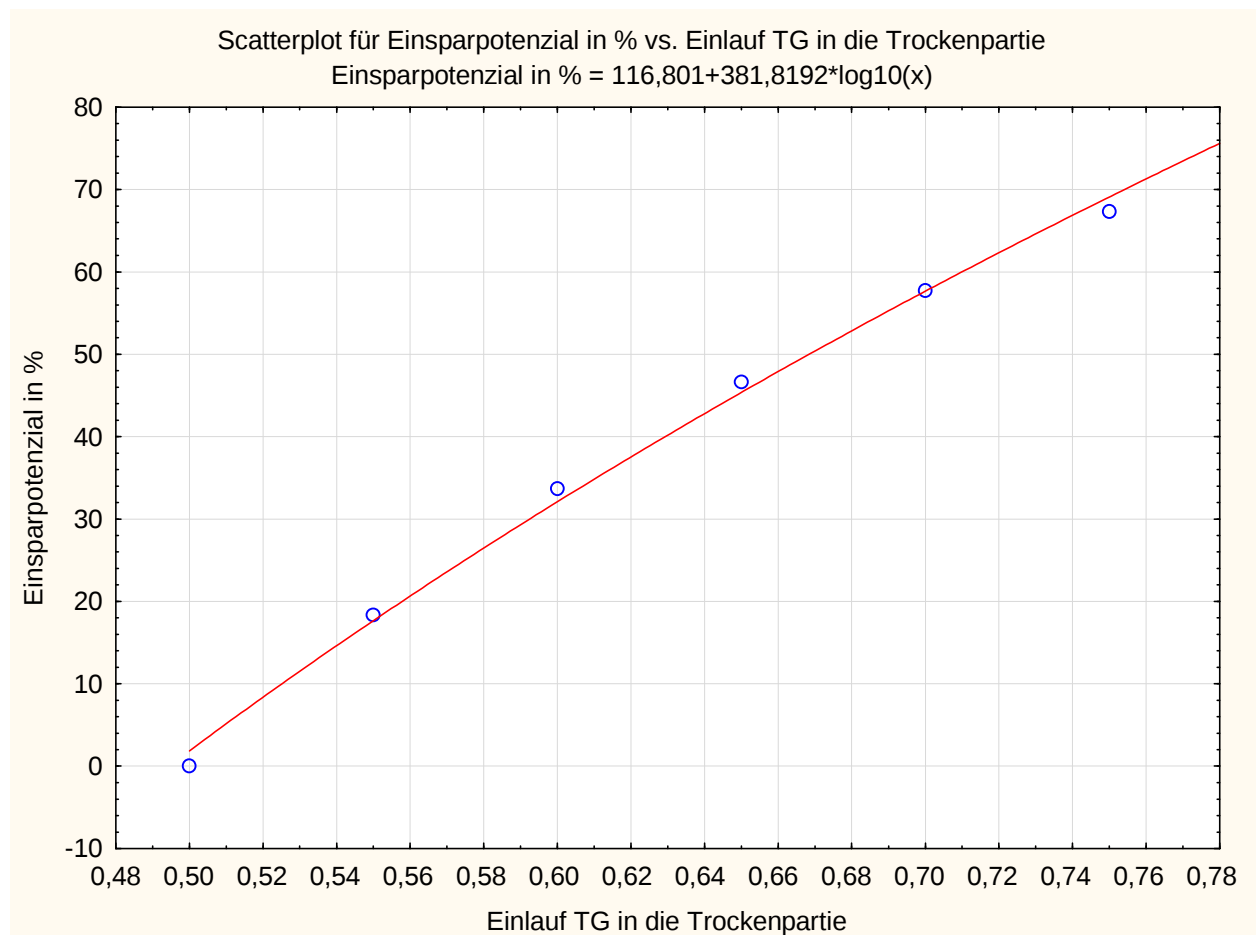


Abbildung 63: Prozentuales Einsparpotential durch Erhöhung des Einlauf Trockengehaltes in die Trockenpartie

5 Zusammenfassung

Die Intensivierung der rein mechanischen Entwässerung von Papierfaserstoffen läßt eine Erhöhung der Trockengehalte um mindestens 10% gegenüber den derzeit mit modernen Pressenkonzepten erreichten Werten zu.

Die untersuchten Altpapiersubstrate, TMP und ungemahlener oder wenig gemahlener Zellstoff (bis 40 kWh/t) zeigen in der Presse etwa vergleichbare Strömungswiderstände und lassen sich gut entwässern.

Die überwiegend fibrillierende Mahlung lagert sehr viel schwer oder nicht mechanisch entfernbare Wasser in die Fasern ein. Dies beweisen die DSC-Messungen, die Steigerungen der nfbw-Fraktion um ca. 70% gegenüber der ungemahlenden Referenz zeigen. Dementsprechend schwierig gestaltet sich die

Entwässerung im FiberXPress. Jedoch sind auch für diese Vertreter des durchflußbegrenzten Pressens etwa 10% höhere Trockengehalte möglich, als es der WRV-Wert erwarten ließe.

Die Presslinge aus dem FiberXPress erfahren eine wesentlich stärkere Verdichtung als Laborprüfblätter aus dem gleichen Faserstoff oder im Falle von Fluting dem unmittelbar nach der Presse entnommenen Maschinenpapier (z.T. 43% höher).

Die Werte von Kink und Curl der Fasern steigen durch die Pressung im FiberXPress. Eine mögliche Erklärung dafür ist, daß durch die Spezifik der Ausbildung des Pads Fasern nicht nur parallel zum Sieb orientiert sind, sondern in etwa auch gleichberechtigt in Richtung der z-Achse (Paddicke). Diese Fasern werden mit Sicherheit während des Pressen stark verformt. Für die praktische Umsetzung eines Pressenkonzeptes mit höherer mechanischer Intensität wird dieser Fall nicht eintreten, da die Fasern in der Blattbildungseinrichtung in der Blattebene orientiert bleiben.

Durch Modifikationen bekannter technischer Lösungen ließe sich bereits in naher Zukunft ein neues Pressenkonzept entwickeln, das vergleichbare Ergebnisse, wie die im Labor erreichten, liefern könnte. Mögliche Eckdaten wären die Verlängerung der Niplänge um den Faktor 5, die Steigerung der Linienkraft um den Faktor 6 und eine Senkung der Papiermaschinengeschwindigkeit auf 500 m/min (z.B. Spezialpapiere). Legt man Erfahrungen aus bekannten Innovationszyklen zugrunde, könnten solche Lösungen in ca. 10 Jahren existieren.

Sehr viel Aufmerksamkeit verdienen die Ergebnisse der DSC-Messung und ihre Interpretation. Sie zeigen, daß sich die nfbw-Fraktion (an Oberflächen gebundenes Wasser) durch die wesentlich höhere Intensität des Pressen nicht nennenswert beeinflussen läßt. Die Rückbefeuchtung getrockneter Proben gelingt beim Primärfaserstoff nahezu vollständig. Bei den Sekundärfaserstoffen ist sie etwas erschwert (Fluting) und erfolgt offensichtlich nicht unbedingt über das Lumen sondern möglicherweise von außen über die Zellwand. Ein negativer Einfluß des Pressens auf die Recyclingfähigkeit kann aus den Ergebnissen der DSC-Messungen nicht geschlossen werden.

Die Recyclingversuche ergaben, daß die gepressten Substrate im Labormaßstab schwierig bis zur Stippenfreiheit zu zerfasern waren. Die Festigkeitseigenschaften haben sich durch das Recycling nicht verschlechtert. Generell ist davon auszugehen, daß die intensivere mechanische Entwässerung das Recyclingpotential nicht verschlechtert. Die Entstippung, die im Labor schwierig sein kann, ist technisch gelöst.

Das Potential der Einsparung thermischer Energie beträgt 702 kJ/kg Papier. Hochgerechnet auf die jährliche Papierproduktion wären es 15817 TJ. Die gegenwärtige CO₂-Emission in Deutschland könnte durch Realisierung des Konzepts um 0,3% bis 0,6% gesenkt werden.

Literaturverzeichnis HM

Böck, K. Z. (1993). *Formeln, Tabellen und Darstellungen für die Papiererzeugung und -verarbeitung*. Gernsbach: Papiermacherschule.

CEPI. (2011). CEPI 2050 Roadmap to a low carbon economy. 22.

Schwister, K., & Leven, V. (2014). *Verfahrenstechnik für Ingenieure*. Leipzig: Fachbuchverlag im Carl Hanser Verlag.

Wendt, C. (2007). Rohstoffcharakterisierung hinsichtlich Pressenentwässerung mittels einer pneumatischen Presse. *Diplomarbeit, unveröffentlichte Arbeit der Hochschule München*.

Literaturverzeichnis PTS

- i MALONEY, T., PAULAPURO, H, STENIUS, P
Hydration and swelling of pulp fibers measured with differential scanning calorimetry.
Nordic Pulp and Paper Research Journal 13(1):31-36(1998).
- ii PARK, S.; VENDITTI, R. A., JAMEEL, H. und J. J. PAWLAK
Changes in pore size distribution during the drying of cellulose fibers as measured by differential scanning calorimetry
Carbohydrate Polymers 66(1): 97–103 (2006).

Das Titelbild zeigt eine Voith NipcoFlex T Schuhpresse aus folgender Quelle:

https://www.voith.com/de/maerkte-branchen/branchen/papier/twogether-online/artikel_61439.html