

INFOR-Projekt Nr. 141 R

**Energieoptimierung der Papierherstellung auf der Basis
des physikalisch notwendigen Energiebedarfs aus-
gewählter Teilprozesse**

Schlussbericht

Juni 2012

Technische Universität Dresden
Professur für Papiertechnik

Fachhochschule München
Fachbereich 05/Papierherzeugung
Papiertechnisches Stiftung PTS

Prof. Dr.-Ing. Harald Großmann
Projektleiter:
Dipl.-Ing. Toni Handke

Prof. Dr. Hans Joachim Naujock

Dr. Frank Miletzky
Projektleiter:
Dipl.-Ing. Christian Bienert
Dipl.-Ing. Tobias Brenner



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN-FH
MÜNCHEN



Fakultät Maschinenwesen Institut für Holz- und Papiertechnik

Professur für Papiertechnik

Abschlussbericht

Energieoptimierung der Papierherstellung auf der Basis des physikalisch notwendigen Energiebedarfs ausgewählter Teilprozesse (INFOR-Projekt Nr. 141 R)

Prof. Dr.-Ing. H. Großmann, TU Dresden
Prof. Dr. Hans Joachim Naujock, Hochschule München
Dipl.-Ing. Christian Bienert, PTS
Dipl.-Ing. Tobias Brenner, PTS
Dipl.-Ing. Toni Handke, TU Dresden

Juni 2012

Das Forschungsprojekt wird gefördert über das Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V., Bonn

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
------------------------------------	----------

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis.....	VII
--	------------

Tabellenverzeichnis.....	VIII
---------------------------------	-------------

1 Einleitung und Zielstellung	1
--	----------

2 Ermittlung des theoretischen Energiebedarfs ausgewählter Teilprozesse	1
--	----------

2.1 Zerfaserung	1
-----------------------	---

2.1.1 Allgemein.....	1
----------------------	---

2.1.2 Kalkulation der internen Blattfestigkeit mittels Coverage und RBA.....	1
--	---

2.1.3 Bewertung der Ansätze.....	2
----------------------------------	---

2.2 Druckfarbenentfernung	3
---------------------------------	---

2.3 Mahlung.....	5
------------------	---

2.3.1 Ausgangssituation	5
-------------------------------	---

2.3.2 Grundsätzliche Überlegungen zur Energieumwandlung bei der Faserstoffmahlung..	5
---	---

2.3.3 Entwicklung einer Methode zur Bestimmung des chemisch gebundenen Wassers...	6
---	---

2.3.4 Beschreibung der Methode zur WRV Bestimmung mit dem FiberXpress.....	8
--	---

2.3.5 Definition der physikalisch notwendigen Energiemenge bei der Mahlung	9
--	---

2.3.6 Experimentelle Ergebnisse	9
---------------------------------------	---

2.3.6.1 Vergleich des konventionellen WRV mit den Werten des FiberXpress.....	9
---	---

2.3.6.2 Betrachtung der energetischen Effizienz der Mahlung auf der Basis des chemisch gebundenen Wassers	11
---	----

2.3.6.3 Untersuchungen an DIP-Stoff	13
---	----

3 Energieverbrauch in heutigen Stoffaufbereitungen	15
---	-----------

4 Trockensortierung von Altpapier	16
--	-----------

4.1 Aufbereitungsanlagen zur Trockensortierung von Altpapier	17
--	----

4.2 Anteil papierfremder Bestandteile und brauner Papiere in der Deinkingware nach Trockensortierung.....	23
---	----

4.2.1 Abschätzung des spezifischen Energiebedarfs sowie weiterer Kostenfaktoren in Trockensortieranlagen	26
--	----

4.2.2 Trie-Inking.....	27
------------------------	----

5 Bewertung von Prozessen und Verfahren in anderen Industriebranchen	29
---	-----------

5.1 Wesentliche Wirkmechanismen bei den Prozessen und Verfahren der Papierherstellung.....	29
--	----

5.2 Prozesse und Verfahren in anderen Industriebranchen mit den wesentlichen Wirkmechanismen der Papierherstellung.....	29
---	----

5.2.1	Zerfaserung und Zerkleinerung durch Überwindung von Bindungskräften	30
5.2.1.1	Wirkprinzipien aus der Sicht der Verfahrenstechnik	31
5.3	Zerkleinerung in der Abfallwirtschaft	32
5.3.1.1	Alternative Bauarten von Mahlmaschinen	33
5.4	Zerkleinerungsmühlen	33
5.4.1	Mahlkörpermühlen	33
5.4.2	Kugelmühlen.....	34
5.4.3	Rührwerkskugelmühlen	34
5.4.4	Prallmühlen.....	35
5.4.5	Rotorprallmühlen	36
5.4.6	Stab-/Stiftmühle	38
5.4.7	Ablösung von Verunreinigungen durch Überwindung von Adhäsionskräften.....	38
5.4.8	Trennung von Feststoffen und Stoffkomponenten.....	39
5.4.9	Trennung der Feststoffe und Stoffkomponenten vom Wasser	40
5.5	Zusammenfassung	40
6	Alternative Verfahren.....	42
6.1	Zustand und Bewertung des Ausgangsmaterials	42
6.2	Zerfaserung mittels Doppelschneckenextruder am Technikum Freital-Hainsberg ...	42
6.2.1	Aggregat und Arbeitsweise	42
6.2.2	Versuchsplan und Durchführung.....	43
6.2.3	Ergebnisse.....	43
6.3	Zerfaserung mittels Hobart-Pulper an der PPT	44
6.3.1	Aggregat und Arbeitsweise	44
6.3.2	Versuchsplan und Durchführung.....	45
6.3.3	Ergebnisse.....	45
6.4	Trockenzerfaserung mittels Turborotormühle Fa. Görgens	46
6.4.1	Aggregat und Arbeitsweise	46
6.4.2	Ergebnisse der Zerfaserungsversuche	48
6.4.3	Durchführung und Ergebnisse einer Mahlreihe	49
6.4.4	Mikroskopische Faserstoffbewertung.....	50
6.4.5	Durchführung und Ergebnisse eines Großversuches am Technikum Fa. Görgens .	50
6.5	Vergleich der alternativen Zerfaserungsmethoden mit der industriellen Praxis	51
6.5.1	Einleitung.....	51
6.5.2	Faserstoffbewertung	51
6.5.3	Vergleich der Festigkeiten	52
6.5.4	Vergleich des spez. Energiebedarfs.....	54
6.5.5	Verbesserungspotentiale und Anregungen für weitere Untersuchungen.....	55

6.6	Deinking	56
6.7	Mahlung.....	56
6.7.1	Verwendete Mühlen.....	57
6.7.2	Fritsch Pulverisette 15	57
6.7.3	Fritsch Pulverisette 14	59
6.7.4	Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200	59
6.7.5	Kugelmühle.....	59
6.8	Versuchsdurchführung Trockenmahlung	60
6.9	Versuchsdurchführung Feuchtmahlung	63
6.9.1	Darstellung und Wertung der Ergebnisse	65
6.9.2	Auswertung der Industrierversuche.....	67
6.9.3	Zusammenfassung der Versuche der HM.....	70
7	Fazit und Ausblick	72
	Literaturverzeichnis.....	73

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Optisch und wirklich gebundene Fläche (1).....	2
Abb. 2 Energetisches Potenzial der Faser Mahlung	6
Abb. 3 Abhängigkeit des WRV-Wertes von der verwendeten Zentrifugenbeschleunigung.....	7
Abb. 4 Versuchsanordnung FiberXpress	8
Abb. 5 Vergleich der maximal erreichbaren Trockengehalte WRV-Standard und FiberXpress	10
Abb. 6 Bewertung einer Mahlreihe mit dem klassischen WRV und dem Fiberexpress	11
Abb. 7 Energetische Effizienz der Labormahlung auf der Basis von w_{spez} und w_{ges}	13
Abb. 8 Entwässerungsversuche an einer Mischung von Zeitungen und Zeitschriften	14
Abb. 9 Energiebedarf einer Stoffaufbereitung für höherwertige grafische Papiere auf Basis Altpapier (15)	15
Abb. 10 Prinzipskizze der Trockensortierung von Altpapier (18)	18
Abb. 11 Trommel-Beschickung (19).....	19
Abb. 12 Steigband-Beschickung (20).....	19
Abb. 13 Scheibensieb (21).....	20
Abb. 14 Sternsieb (22).....	20
Abb. 15 Trommelsieb (23).....	21
Abb. 16 Vibrationssieb (24).....	21
Abb. 17 Spaltsiebung (17).....	21
Abb. 18 Deinkingsieb (17).....	21
Abb. 19 Ballistikseparator (25)	21
Abb. 20 Paperspike (19)	21
Abb. 21 NIR-Kamera des Sensorsystems „Unisort SORT IT“ (27)	22
Abb. 22 Sensorsystem „Unisort SORT (27)	22
Abb. 23 Robotorsortiereinheit für die Trockensortierung von Altpapier (27)	23
Abb. 24 Zusammensetzung der Bestandteile an unerwünschten Stoffen in der Deinkingware für Altpapiersortieranlagen in verschiedenen europäischen Ländern (28).....	23
Abb. 25 Zusammensetzung des grafischen Altpapiers in zwei deutschen Papierfabriken zur Produktion grafischer Papiere (28)	24
Abb. 26 Sortierkonzept für die Trockensortierung von Altpapier (27)	24
Abb. 27 Zusammensetzung des Input (Altpapiersorte 1.01) und Output (Altpapiersorten 1.04 und 1.11) einer Trockensortieranlage, 3-tägiger Demonstrationsversuch mit Pilotanlage (31)	25
Abb. 28 Zusammensetzung von Deinkingware nach der Sortierung in verschiedenen Altpapiersortieranlagen (17).....	26
Abb. 29 Aufbereitungsanlage „Trie-Inking“ für die Herstellung von Deinking-Ware, Fa. Trienekens AG (37)	27
Abb. 30 Partikelbeanspruchung (76)	32

Abb. 31 Rührwerkskugelmühle ATR (Quelle: (78))	35
Abb. 32 Beanspruchung an einem Werkzeug (42)	36
Abb. 33 Mühle mit Prallplattenrotor und Siebklassierung (42).....	37
Abb. 34 Mühle mit Prallplattenrotor und Klassierschlitz sowie rotierender Mahlbahn (42).....	37
Abb. 35 Mühle mit Nockenrotor und Siebklassierung (42)	37
Abb. 36 Mühle mit Prallplattenrotor und Stromklassierung (42)	37
Abb. 37 Wirkprinzip der Stabmühle (79)	38
Abb. 38 Schema eines Doppelschneckenextruders.....	43
Abb. 39 Relative Faserlängenverteilung Extruderversuche	44
Abb. 40 Hobart-Pulper an der PPT	45
Abb. 41 Relative Faserlängenverteilung Hobart-Pulper	46
Abb. 42 Aufbau Turborotormühle Fa. Görgens	47
Abb. 43 Faserlängenverteilung der TZF-Versuche als relative Häufigkeitsverteilung.....	48
Abb. 44 Festigkeitsentwicklung der Mahlreihe	49
Abb. 45 Vergleich der relativen Faserlängenverteilungen Trockenzerfaserungsversuche	51
Abb. 46 Vergleich der relativen Faserlängenverteilungen.....	52
Abb. 47 Vergleich der Festigkeiten in Abhängigkeit vom Entwässerungswiderstand	53
Abb. 48 Vergleich des spez. Energiebedarfs	54
Abb. 49 Polymerteilchen vor (links) und nach dem Deinking	56
Abb. 50 Fritsch Pulverisette 15 (84).....	57
Abb. 51 Mahlraum Fritsch Pulverisette 15	58
Abb. 52 Altpapier vor Zerkleinerung	60
Abb. 52 Altpapier vor Zerkleinerung	60
Abb. 53 Altpapier nach Zerkleinerung.....	60
Abb. 54 500 µm Siebring mit 24 Rippen Schlagrotor	61
Abb. 55 Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200	62
Abb. 56 Aufschlaggerät	63
Abb. 57 Mit Kugelmühle gemahlener Stoff.....	64
Abb. 58 Veränderung der Eigenschaftskennwerte durch Trockenzerkleinerung in Abhängigkeit der Trennteilchengröße der verwendeten Mühlen	67
Abb. 59 Relative Änderung der Zugfestigkeit infolge Mahlung	68
Abb. 60 Relative Änderung der Durchreißfestigkeit infolge Mahlung	69
Abb. 61 Vergleich der energetischen Effizienz der Labor- und Praxismahlung auf der Basis von W_{spez}	69

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

AP	Altpapier
BAT	Best available technics
DIP	Deinked Pulp
FiSi	Fichten-Sulfitzellstoff
f	Fibrillierende Mahlung
FXP	FiberXpress
IBS	Internal bond strength
k	Kürzende Mahlung
L	Faserlänge
LWC	Light weight coated
NIR	Nah-Infrarot
OCC	Old corrugated container
SD	Stoffdichte
SR	Schopper Riegler (Entwässerungswiderstand)
TG	Trockengehalt
TZF	Trockenzerfaserung
VIS	Visible light
WRV	Wasserrückhaltevermögen
W	Arbeit
W_{ges}	Arbeit, gesamt
W_{spez}	Spezifische Arbeit

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Vergleich der internen Bindungskräfte nach versch. Messmethoden.....	2
Tab. 2 Vergleich der „BATs“ mit den ermittelten minimal notwendigen Energiebedarf zur Zerfaserung	3
Tab. 3 Verschiedene Werte für Oberflächenspannungen zwischen Druckfarbe und Faser.....	4
Tab. 4 Vergleich der „BATs“ mit den ermittelten minimal notwendigen Energiebedarf zur Druckfarbenentfernung	4
Tab. 5 Daten zur Berechnung der energetischen Effizienz	11
Tab. 6 Zusammensetzung von haushaltnah erfasstem Altpapier (gemischte Ware), Bandbreite (17)	17
Tab. 7 Spezifischer Energiebedarf bezogen auf Input-Material in einer Trockensortieranlage zur Generierung von Deinkingware, Durchsatz ca. 22 t/h	26
Tab. 8 Wirkmechanismen bei der Papierherstellung	29
Tab. 9 Recherchierte Industriebranchen	29
Tab. 10 Übersicht über die in der Abfallwirtschaft eingesetzten Zerkleinerer (76).....	33
Tab. 11 Prozessen und Verfahren in anderen Industriebranchen	41
Tab. 12 Ergebnisse Fasermessung Extruderzerfaserung	43
Tab. 13 Ergebnisse Fasermessung Hobart-Pulper	45
Tab. 14 Ergebnisse Fasermessung Trockenzerfaserung.....	48
Tab. 15 Ergebnisse Fasermessung Technikum Görgens	50
Tab. 16 Schwachstellenanalyse des Istzustandes der Mahlung	57
Tab. 17 Spezifikationen Kegelmühle	59
Tab. 18 Ergebnisse der alternativen Mahlversuche	65

1 Einleitung und Zielstellung

Der aktuelle spezifische Energieverbrauch bei der Papiererzeugung ist die Summe der spezifischen Verbräuche einer großen Zahl an Teilprozessen. Die leistungsfähigsten heute hierfür zur Verfügung stehenden Technologien (Best-Available-Technologies, BAT) sind überwiegend das Ergebnis Jahrzehnte langer intensiver und erfolgreicher Optimierungsarbeit.

Es ist deshalb zu erwarten, dass die durch eine weitere nur evolutionäre Weiterentwicklung dieser Prozesse bezüglich des spezifischen Energieinsatzes erschließbaren Einsparpotenziale nur noch sehr begrenzt und deshalb alleine nicht ausreichend sein werden, um die hohen, von Politik und Gesellschaft gesetzten Ziele bezüglich Energieverbrauch, CO₂ Ausstoß und Environmental Footprint mittelfristig zu erreichen.

Vor diesem Hintergrund sollen deshalb im Rahmen des Projektfelds 1 des INFOR-Resourcenschwerpunkts Papier 2030 Ideen für innovative, gegebenenfalls für die Papiererzeugung völlig neue Techniken entwickelt und ihre technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit geprüft werden. Parallel hierzu soll eruiert werden, ob in anderen Industriebereichen ähnliche Aufgabenstellungen energieeffizienter gelöst werden und – falls dies zutrifft –, ob und wie weit sie auf die Papiererzeugung übertragen werden können.

2 Ermittlung des theoretischen Energiebedarfs ausgewählter Teilprozesse

2.1 Zerfaserung

2.1.1 Allgemein

Zur Ermittlung der theoretisch notwendigen Zerfaserungsenergie ist Wissen über die vorherrschenden Bindungskräfte im Papiergefüge erforderlich.

Messmethoden, welche die innere Bindungskraft bestimmen, sind in der Literatur beschrieben, sie beantworten die Frage nach der beherrschenden Bindungsenergie jedoch sehr unterschiedlich ((1), (2), (3), (4)).

Man kann sie in folgende Kategorien einordnen:

- **Direkte Messmethoden** (Bindungskraft zwischen Einzelfasern)
- **Indirekte Messmethoden** (Messung am Blattgefüge, z. B. z-Festigkeit)
- **Theoretische Bestimmung** (Wasserstoffbrückenbindungen)

2.1.2 Kalkulation der internen Blattfestigkeit mittels Coverage und RBA

Mittels des Konzeptes aus Coverage und RBA kann die interne Bindungsenergie bestimmt werden, die im Papier enthalten ist, insofern die entsprechenden Fasereigenschaften bekannt sind.

Dies wurde versuchsweise für ein LWC-Papier mit einer flächenbezogenen Masse von 55 g/m² durchgeführt. Die erforderlichen Fasereigenschaften wurden mit dem Kajaani-FiberLAB bestimmt. Die Messung von 52,7 mg Fasern bzw. 9,588 cm² ergab 404504 Fasern. Bei einer Faserlänge von 0,55 mm und einer Faserbreite von 22,1 µm ergibt sich für $c = 5,126$ und die totale Faseroberfläche $2cA = 10,252 \text{ cm}^2$.

Multipliziert mit der $RBA = 0,8061$ ermittelt man eine gebundene Fläche von 8,264 m²/m² Papier.

Mit Hilfe der gebundenen Fläche können nun die Bindungsenergien, unterschieden nach den verschiedenen Messmethoden auf dieses Papier übertragen werden (s. Tab. 1)

Tab. 1 Vergleich der internen Bindungskräfte nach versch. Messmethoden

Messmethode	Theorie	Charakteristika	Angaben zur IBS	
			J/m ²	kWh/t
Indirekt	Stratton	Gefügefestigkeit, ermittelt über z-Festigkeitsmessung und Proportionalitätsfaktor für RBA von 0,045	7,00	0,0486
Theoretisch	Nissan	Blattfestigkeit als Summe der Bindungskraft von Wasserstoffbrückenbindungen pro gebundener Fläche	1,066	0,0054
Direkt	Davidson	Festigkeitsmessung von einzelnen Faser-Faserbindungen, Faktor für RBA errechnet sich aus gemessener Festigkeit einzelner Faser-Faserbindungen geteilt durch die Kraft einzelner Wasserstoffbrückenbindungen	0,012	0,0001

2.1.3 Bewertung der Ansätze

Angesichts dieser sehr unterschiedlichen Ergebnisse stellt sich die Frage, welcher dieser drei Ansätze der Realität am nächsten kommt.

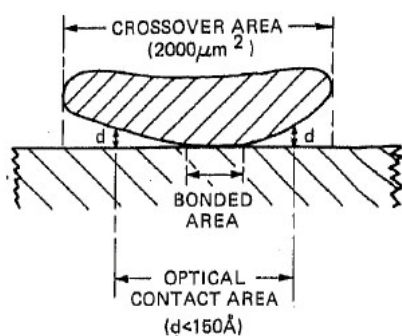


Abb. 1 Optisch und wirklich gebundene Fläche (1)

Ausgehend von den Ergebnissen von Nissan zeigt Davidson die offensichtliche Diskrepanz zwischen der optisch gemessenen und der tatsächlich vorhandenen gebundenen Fläche auf. Sein „direkter“ Ansatz bezieht sich auf die wirklich gebundene Fläche, der „theoretische“ Ansatz mit der Bindungsenergie von Nissan bezieht sich auf die vollständig optisch gebundene Kontaktzone, die in der Realität jedoch nicht vollständig auf Grund des Abstands durch Wasserstoffbrückenbindungen gebunden sein kann (s. Abb. 1).

Es wird deutlich, dass der Einfluss der Gefügestruktur auf das Ergebnis der Messungen von Stratton sehr groß ist. Angesichts der viskoelastischen Eigenschaften von Papier ist anzunehmen, dass ein Großteil der aufgebrachten Energie der Messanordnungen in elastische und plastische Verformung der Fasern umgewandelt wird und nur ein kleiner Teil wirklich zur Aufspaltung von Wasserstoffbrückenbindungen benötigt wird.

Angesichts dieser Einflussfaktoren können die Ergebnisse von Stratton für eine realistische Bewertung der internen Bindungsfestigkeit nicht herangezogen werden.

Selbst wenn die vollständige Fläche, die sich aus allen Faserkreuzungspunkten zusammensetzt, durch Wasserstoffbrückenbindungen gebunden wäre, würde sich maximal der von Nissan bestimmte Wert ergeben. Der Wert nach Stratton liegt jedoch über diesem maximal erreichbaren Wert.

Da nach Davidson auch dieser theoretische Maximalwert nicht realistisch erscheint und Stratton wegen der Verluste im Messgerät und Papiergefüge andere Werte ausweist, ist der reale Wert für die interne Bindungsenergie in der Ergebnisspanne zwischen Nissan und Davidson zu suchen.

Tab. 2 Vergleich der „BATs“ mit den ermittelten minimal notwendigen Energiebedarf zur Zerkleinerung

	BAT (5)		Theorie	
	Pulper	Trommel	Nissan	Davidson
spez. Energiebedarf in kWh/t	38-43	12-14	0,0072	0,0001
Faktor			10^{-3}	10^{-5}

Tab. 2 zeigt, dass sich der Energieverbrauch in den dem heutigen Stand der Technik entsprechenden Anlagen deutlich von diesem minimalen Energiebedarf unterscheidet. Aus den ermittelten Zahlen ergibt sich ein Wirkungsgrad für die Zerkleinerung, der weit unter 0,001 % liegt. Dies bestätigt die Annahme, dass die Zerkleinerung den meisten Teil der eingebrachten Energie für Transportvorgänge (Pump- oder Rührleistungen) und zur Förderung und Umwälzung der Suspension verbraucht.

2.2 Druckfarbenentfernung

Die Bestimmung der theoretisch minimalen Energie zur Druckfarbenentfernung von der Cellulosefaser kann anhand der Adhäsionskräfte zwischen der Faser und der Druckfarbe abgeschätzt werden.

Die Adhäsion zwischen Cellulose und Druckfarbe, W_{CD} , wird durch die Dupre-Gleichung (6) berechnet:

$$W_{CD} = \gamma_C + \gamma_D - \gamma_{CD} \quad (2.1)$$

$\gamma_{C/D}$ = Oberflächenspannung der Cellulose bzw. der Druckfarbe

γ_{CD} = Grenzflächenspannung zw. Cellulose/Druckfarbe

Die Grenzflächen- und Oberflächenspannung ergibt sich aus dem Lifshitz-van der Waals- und dem Acid/Base-Ansatz [(6), (7)]:

$$\gamma_{C/D} = \gamma_{C/D}^{LW} + 2(\gamma_{C/D}^{+} \cdot \gamma_{C/D}^{-})^{1/2} \quad (2.2)$$

$$\gamma_{CD} = \gamma_{CD}^{LW} + \gamma_{CD}^{AB} \quad (2.3)$$

$$\gamma_{CD}^{LW} = [(\gamma_C^{LW})^{1/2} - (\gamma_D^{LW})^{1/2}]^2 \quad (2.4)$$

$$\gamma_{CD}^{AB} = 2[(\gamma_C^+ \cdot \gamma_C^-)^{1/2} + (\gamma_D^+ \cdot \gamma_D^-)^{1/2} - (\gamma_C^+ \cdot \gamma_D^-)^{1/2} - (\gamma_C^- \cdot \gamma_D^+)^{1/2}] \quad (2.5)$$

γ^{LW} = Lifshitz-van der Waals-Komponente der Oberflächenspannung

γ^{AB} = Acid/Base-Komponente der Oberflächenspannung (inkl. Wasserstoffbrücken)

γ^+ = Lewis-Säure-Komponente

γ^- = Lewis-Base-Komponente

Setzt man die Formel (2.2) bis (2.5) in Formel (2.1) ein, ergibt sich für die Adhäsion:

$$W_{CD} = 2[(\gamma_C^{LW} \cdot \gamma_D^{LW})^{1/2} + (\gamma_C^+ \cdot \gamma_D^-)^{1/2} + (\gamma_C^- \cdot \gamma_D^+)^{1/2}] \quad (2.6)$$

Verwendet man aus der folgenden Tabelle die Oberflächenspannungen, welche in Studien [(7), (8)] ermittelt wurden, kann die Adhäsion zwischen Cellulose und Druckfarbe berechnet werden.

Tab. 3 Verschiedene Werte für Oberflächenspannungen zwischen Druckfarbe und Faser

in mJ/m ²	γ	γ^{LW}	γ^{AB}	γ^+	γ^-	Literatur
Cellulose	45	42,3	2,67	0,031	57,7	(7)
Offset-Ink	30,8	25,1	5,63	0,46	17,22	(7)
Cellulose	58,8	40	18,8	2	44	(8)
Flexographik-Ink	101,4	46	55,4	12	46	(8)

- Adhäsion zw. Cellulose und Offset-Ink $W_{CO} = 76,93 \text{ mJ/m}^2$
- Adhäsion zw. Cellulose und Flexographic-Ink $W_{CO} = 150,93 \text{ mJ/m}^2$

Mit der nun bekannten Adhäsionskraft kann vereinfacht die spezifische Energie zur Trennung Cellulose/Druckfarbe berechnet werden. Dafür wird ein beidseitig bedrucktes Papier mit einem Flächengewicht von 45 g/m² angenommen. Die Seiten sind zu 50 % bedruckt. Dies bedeutet, 1 m² Druckfläche entspricht 45 g Papier.

- spez. Energie zur Trennung Cellulose/Offset-Ink $E_{\text{spez.}} = 0,000475 \text{ kWh/t}$
- spez. Energie zur Trennung Cellulose/Flexodruck-Ink $E_{\text{spez.}} = 0,000932 \text{ kWh/t}$

In Tab. 4 ist der Vergleich der sich aus den Adhäsionskräften berechnete minimale Energieeinsatz mit dem Stand der Technik entsprechendem Energieeinsatz für die Ablösung von Druckfarbenteilchen dargestellt.

Tab. 4 Vergleich der „BATs“ mit den ermittelten minimal notwendigen Energiebedarf zur Druckfarbenentfernung

	Vorflot. (9)	Offset	Flexographic
	kWh/t	kWh/t	kWh/t
Spez. Energiebedarf	30-38	0.00047	0.00093

Faktor		10^{-5}	10^{-5}
--------	--	-----------	-----------

Um die Adhäsionskräfte zu überwinden ist danach nur ein hunderttausendstel der in einer Flotationsstufe aufgewendeten Energie notwendig. Hierbei muss beachtet werden, dass der Ansatz für die Berechnung der spez. Energie für ein zweidimensionales Papiergefüge ist und bei einer dreidimensionalen Betrachtung des Papiergefüges etwas höher liegen sollte.

2.3 Mahlung

2.3.1 Ausgangssituation

Es ist seit langem bekannt, dass der energetische Wirkungsgrad bei der Faserstoffmahlung unbefriedigend ist. In der Literatur gibt es Abschätzungen, welcher Anteil der eingesetzten Energie tatsächlich zur Stoffwandlung benötigt wird (10). Dabei reicht die Spanne nach Einschätzung der Autoren beim Wirkungsgrad zwischen 0,1 % und 10 %. Bisher fehlte es an Methoden, die energetische Effizienz nach objektiven Kriterien zu bewerten. Aus diesem Grund ergab sich die Notwendigkeit nach einer Methode zu suchen, die eine physikalisch begründete Bilanzierung erlaubt.

2.3.2 Grundsätzliche Überlegungen zur Energieumwandlung bei der Faserstoffmahlung

Verwendet man ungemahlene Zellstofffasern zur Blattbildung, erhält man in der Regel ein hoch voluminöses Flächengebilde, das nur eine geringe Gefügefestigkeit ausbildet. Dabei wird die Gefügefestigkeit häufig als Zugfestigkeit bewertet. Die Oberfläche der Zellstofffasern ist durch den Aufschluss bereits in einem geringen Maße fibrilliert und zwar bei Sulfitzellstofffasern etwas mehr als bei Sulfatzellstofffasern. Die Ursache liegt in der Kinetik des Aufschlusses. Beim Sulfitaufschluss erfolgt der Angriff der Kochchemikalien mit der höchsten Konzentration von der Mittellamelle ausgehend. Dabei wird die mechanisch sehr resistente Primärlamelle stark geschädigt und Fibrillen aus der Sekundärlamelle können die Faseroberfläche erreichen. Beim Sulfataufschluss wird die höchste Anfangskonzentration der Chemikalien im Lumen erreicht. Der Aufschluss beginnt hier und lässt die Primärlamelle in größerem Ausmaße intakt. Nachweisbar wird diese These durch eine Reihe von Untersuchungen, die die Verteilung der Kohlenhydrate über den Faserquerschnitt analysiert haben (11).

Die Gefügefestigkeit bleibt aber sehr gering, da einerseits die Fasern wenig bindungsaktive Oberfläche zur Verfügung stellen können und sie andererseits auch unflexibel sind. Die Abb. 2 soll diese Verhältnisse verdeutlichen. Die Ordinate zeigt die kumulierte Bindungsenergie, die in Atombindungen, Wasserstoffbrückenbindungen und van der Waal'schen Bindungen, also den Bindungen, die in der Cellulose vorkommen kann. Die Abszisse zeigt qualitativ das Ausmaß der eingesetzten massespezifischen Mahlungsenergie.

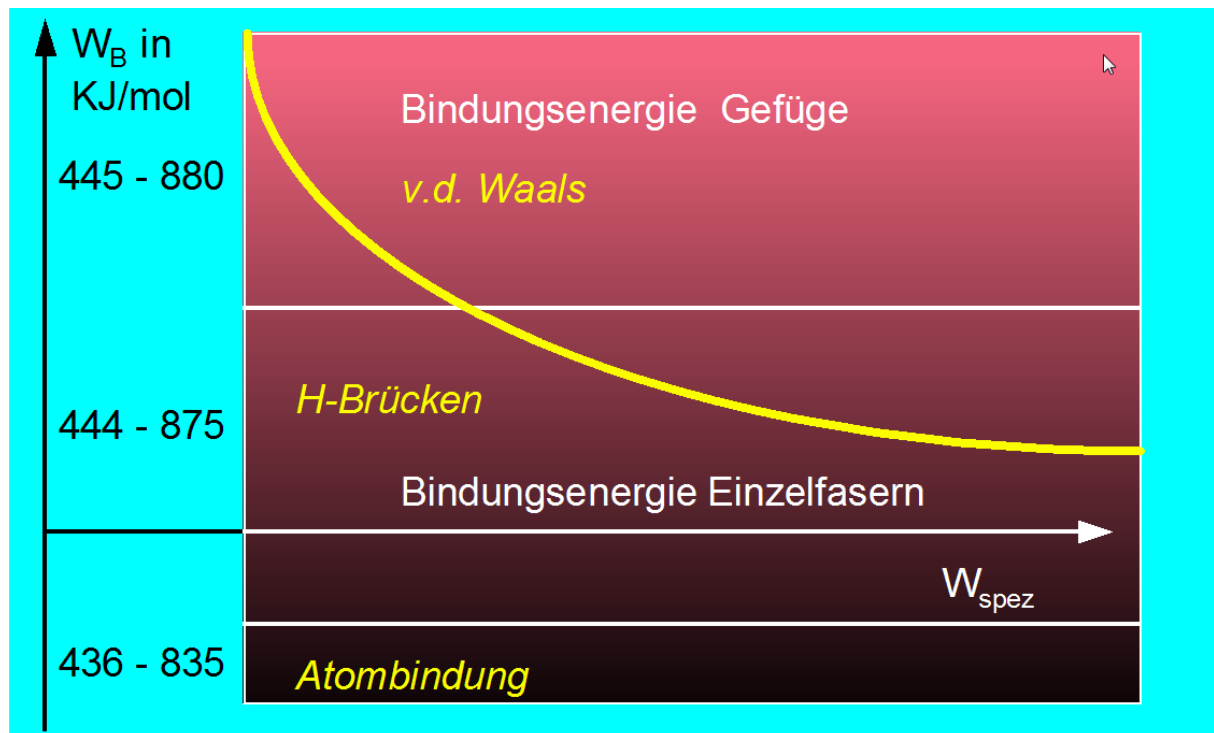


Abb. 2 Energetisches Potenzial der Faser Mahlung

Es wird unterstellt, dass eine rein mechanische Faserbehandlung nur von der Waal'sche und einen Teil der Wasserstoffbrückenbindungen aufbrechen kann. Dies auch nur, wenn ausreichend Wasserdipole im System vorhanden sind, die in Wechselwirkung mit den mechanischen Kräften durch Quellung die interne Faserstruktur aufgelockert haben und neu geschaffene Oberflächen sofort belegen. Es wird weiterhin unterstellt, dass die kovalenten Bindungen bei normalen Prozesstemperaturen durch mechanische Energie allein nicht aufgehoben werden können. D.h., dass selbst eine faserkürzende Mahlung allein über das Aufbrechen von Wasserstoffbrückenbindungen und von der Waal'schen Bindungen erreicht werden kann.

2.3.3 Entwicklung einer Methode zur Bestimmung des chemisch gebundenen Wassers

Es wird unterstellt, dass die durch mechanische Bearbeitung neu geschaffenen Celluloseoberflächen mit Wasserdipolen belegt werden. Das auf diese Art gebundene Wasser (von der Waal'sche Bindungen, Wasserstoffbrückenbindungen) sei mit mechanischen Mitteln nicht mehr entfernbar. Damit würde jetzt nur noch eine Methode benötigt, die alles mit mechanischen Mitteln entfernbares Wasser aus Papierfasern auch tatsächlich entfernt. Es liegt daher nahe, an die Bestimmungsmethode für das Wasserrückhaltevermögen (WRV) zu denken. In Untersuchungen, die bereits längere Zeit zurückliegen, zeigte sich, dass eine Zentrifugalbeschleunigung von 3000 g bei weitem nicht ausreicht, alles mit mechanischen Mitteln entfernbares Wasser aus dem Faserstoff zu entfernen. Die Abb. 3 zeigt die Entwicklung des WRV eines Fichtensulfitzellstoffes (ungemahlen) und eines Altpapierstoffes (OCC), der ungemahlen bzw. nach der Mahlung in der JOKRO-Mühle für 15 und 35 Minuten behandelt, die zur Untersuchung von Porengrößenverteilungen bei einer Zentrifugalbeschleunigung von nahe 60.000 g entwässert wurden (12).

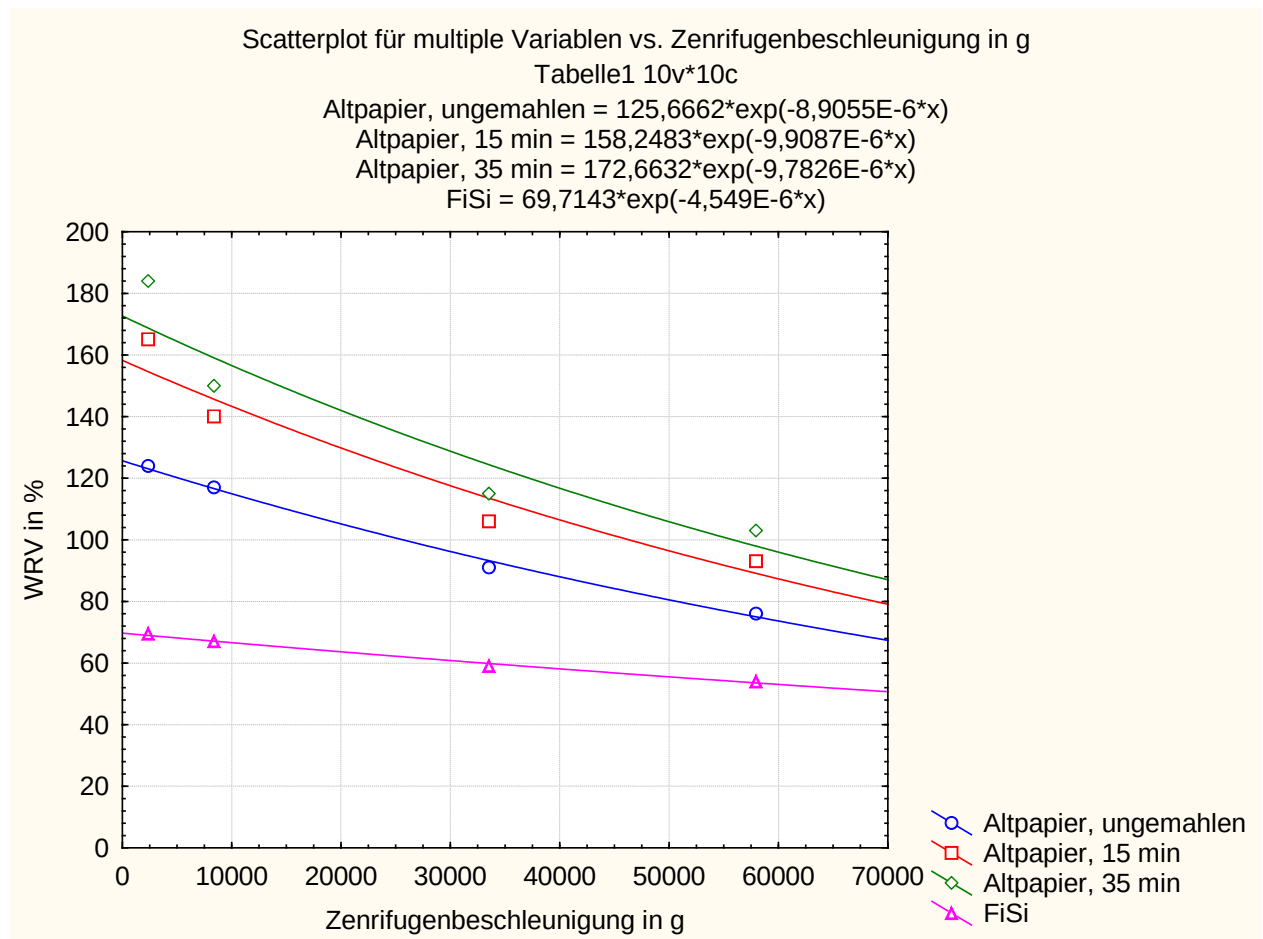


Abb. 3 Abhängigkeit des WRV-Wertes von der verwendeten Zentrifugenbeschleunigung

Es wird ganz klar erkennbar, dass der Faserstoff bei Beschleunigungen jenseits der 3000 g noch in bedeutendem Umfang weiter entwässert. Damit ist gezeigt, dass die derzeitige Bestimmungsmethode für das WRV ihrem physikalischen Anspruch nicht gerecht wird.

In einer Diplomarbeit, die gemeinsam mit der Firma Voith durchgeführt wurde (13), entwickelte und testete man ein Gerät zur Pressensimulation, den FiberXpress. Das Gerät entwässert einen Faserstoffkuchen mit Drücken von bis zu 10 MPa. Im Vergleich dazu arbeitet die 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. Durch die Anwendung des FiberXpress bestand erstmals die Möglichkeit, dem Anspruch, alles mit mechanischen Mitteln entfernbare Wasser auch zu entfernen, physikalisch sehr nahe zu kommen. In Abb. 4 ist die Versuchsanordnung zu erkennen.

Da das Gerät möglicherweise noch nicht so sehr bekannt ist, soll an dieser Stelle eine kurze Beschreibung des Wirkprinzips erfolgen: Im oberen Teil des Gerätes befindet sich ein Arbeitskolben mit einer großen Fläche. Dieser Kolben wird mit Pressluft beaufschlagt. Er belastet den Kolben im unteren Teil des Gerätes, der eine wesentlich geringere Querschnittsfläche aufweist.



Abb. 4 Versuchsanordnung FiberXpress

Damit vervielfacht sich der Druck, der letztlich auf den Faserstoffkuchen ausgeübt wird. Der Faserstoffkuchen entwässert über ein feines Sieb. Darunter befindet sich in der Achse des Gerätes eine kleine Abflussöffnung mit einer Spritzenkanüle, durch die das abgepresste Wasser aus dem Gerät ausfließen kann. Das Wasser läuft in einen Erlenmeyerkolben, der auf einer Waage steht. Die Masse des ausgetreten Wassers wird sekundlich erfasst und an einen Computer übertragen. Auf diese Weise erhält man eine Entwässerungskurve in Abhängigkeit von der Zeit. Die Masse des feuchten Pellets wird nach dem Pressvorgang ermittelt. Anschließend wird das Pellet in der rechts im Bild erkennbaren Mikrowellenwaage getrocknet. Somit stehen auch alle Daten zur Verfügung, die zur Berechnung des WRV notwendig sind.

2.3.4 Beschreibung der Methode zur WRV Bestimmung mit dem FiberXpress

Es wird ein konstanter Druck von 9 MPa verwendet. Analog zur WRV Messung beträgt die Entwässerungszeit 900 s. Der Faserstoffeintrag beträgt rund 4 g otro. Dies entspricht einer flächenbezogenen Masse des Pellets von 2000 g/m². Das feuchte Pellet wird anschließend dem Gerät entnommen und mit Hilfe der Mikrowellenwaage getrocknet. Das WRV ergibt sich dann zu:

$$WRV = \frac{1}{TG} - 1 \cdot (100\%)$$

TG ist der vom Computer berechnete und ausgewiesene Endtrockengehalt. Die Messzeit wurde analog zur WRV-Bestimmung nach der Zentrifugenmethode gewählt. Der zeitliche Verlauf der Entwässerungskurve enthält noch eine Reihe anderer In-

formationen wie zum Beispiel den Fließwiderstand des Faserstoffes. Diese Informationen sind für die Pressensimulation wichtig. Im Rahmen des vorliegenden Projektes werden sie nicht ausgewertet. Die angewandte Bestimmungsmethode für das WRV durch Pressen kommt dem physikalischen Sachverhalt wesentlich näher als die Zentrifugenmethode. Wie aus der Abb. 4 gut erkennbar ist, bleibt das abgepresste Wasser relativ klar, so dass beim Entwässerungsvorgang keine nennenswerten Mengen an Feinstoff verloren gehen, die das Ergebnis verfälschen würden.

2.3.5 Definition der physikalisch notwendigen Energiemenge bei der Mahlung

Der Definition liegt die Arbeitshypothese zu Grunde, dass beim Vergleich zweier Zustände (zum Beispiel gemahlen-ungemahlen) die Differenz der Masse des chemisch gebundenen Wassers das Maß für die Energieumwandlung bei der Schaffung neuer Oberflächen ist. Dieses Wasser kann nur noch thermisch entfernt werden. Die Energie, die zur thermischen Wasserentfernung notwendig ist, wird gleichgesetzt mit der im Faserstoff konvertierten Energie. Es wird von einer spezifischen Verdampfungswärme von 2258 kJ/kg Wasser ausgegangen (Atmosphärendruck). Und den energetischen Wirkungsgrad zu definieren, wird die Wärmemenge, die zur Verdunstung des zusätzlich gebundenen Wassers benötigt wird, auf den Energieeintrag bei der Mahlung bezogen. Die Bezugsgröße kann der massebezogene mittlere Arbeitsbedarf (w_{spez}) sein. Der physikalischen Realität wird aber besser entsprochen, wenn man über die Gesamtleistung (P_{ges}) und die Zeit bilanziert.

2.3.6 Experimentelle Ergebnisse

2.3.6.1 Vergleich des konventionellen WRV mit den Werten des FiberXpress

In der Abb. 5 sind die maximal erreichbaren Trockengehalte von gemahlenen Zellstoffen dargestellt, die zum einen mit der Zentrifugenmethode erzielt worden sind, zum anderen mit dem Fiberexpress. Würden beide Methoden physikalisch gleichwertig differenzieren, dann müsste die rote Punktwolke auf der blauen Geraden liegen (Gleichverteilung).

Man erkennt deutlich, dass der Fiberexpress viel stärker differenziert als die Zentrifugenmethode. Die durch Pressen erreichten Trockengehalte sind wesentlich höher. Das kleine Diagramm im Diagramm zeigt die Punktwolke in einer besseren Auflösung. Die in dem kleinen Diagramm angegebene Korrelation zwischen beiden Methoden ist bis zu einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % signifikant. Da der Fiberexpress wesentlich gründlicher entwässert, sind auch die errechneten WRV Werte wesentlich niedriger als nach der Zentrifugenmethode. Das nachfolgende Abb. 5 zeigt die Ergebnisse an einer Mahlreihe für Kiefernulfatzellstoff. Dieser Faserstoff wurde mit Hilfe des 12“-Laborrefiners der Hochschule München einmal überwiegend kürzend und zum anderen überwiegend fibrillierend gemahlen. Generell kann festgestellt werden, dass fibrillierende Mahlung den WRV Wert stärker steigert. Nach der konventionellen Bewertung erreicht der Endwert etwa 280 %. Da der

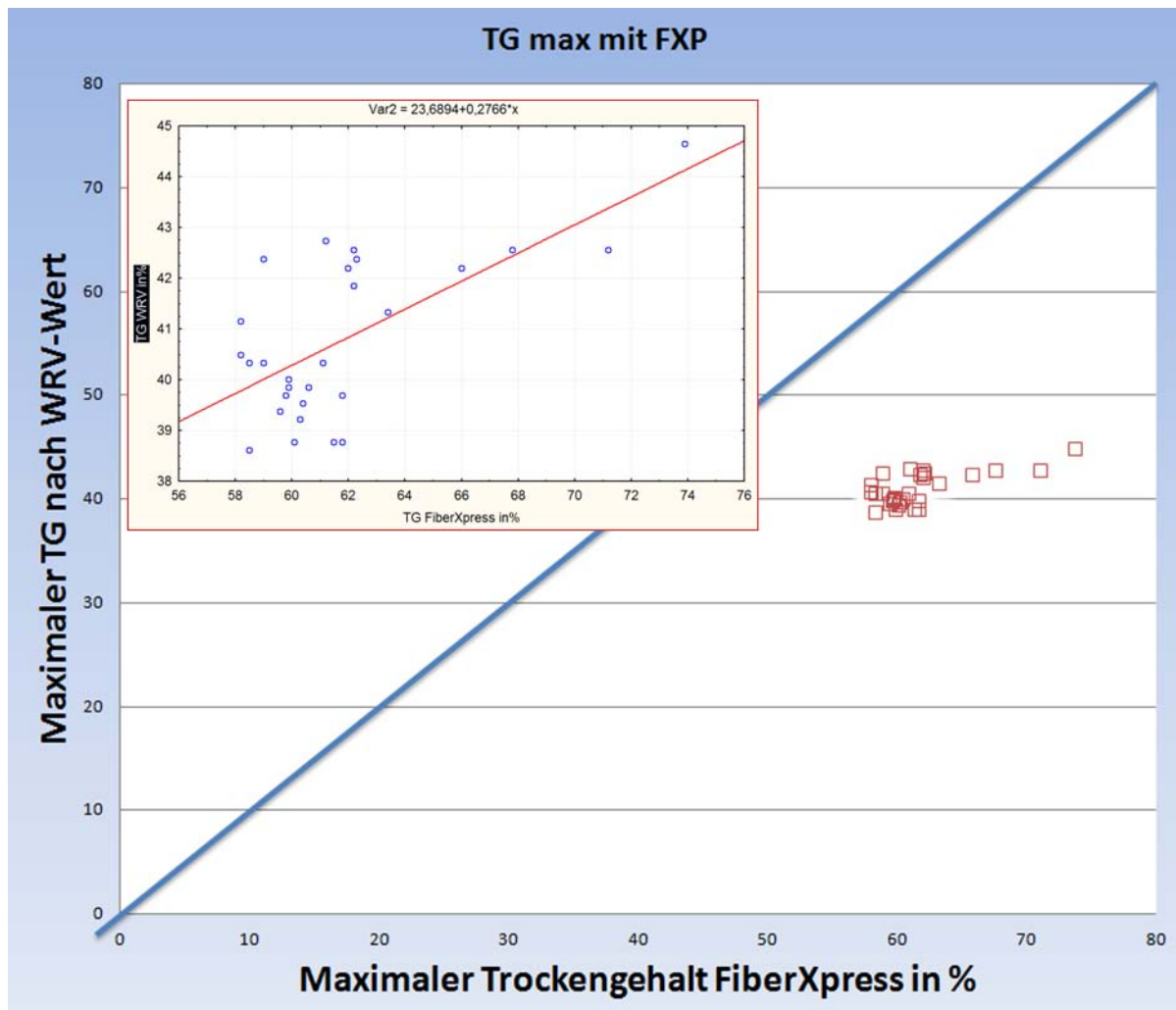


Abb. 5 Vergleich der maximal erreichbaren Trockengehalte WRV-Standard und FiberXpress
 Fiberexpress wesentlich mehr Wasser entfernt als die Zentrifuge, sind auch die mit ihm ermittelten Werte für das WRV wesentlich niedriger. Es werden Endwerte um 60 % ausgewiesen.

Die Abb. 6 zeigt sehr deutlich, dass wesentlich weniger Wasser chemisch an den Faserstoff gebunden ist, als gemeinhin erwartet. Mit anderen Worten: Mit mechanischen Mitteln lässt sich deutlich mehr Wasser aus dem Faserstoff entfernen, als die bisherige Betrachtungsweise vermutet. Dies erlaubt auch eine optimistische Prognose im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Pressen für Papiermaschinen. Es erscheint möglich, Trockengehalte von über 70 % auf rein mechanischem Wege zu erzielen. Könnte man dieses Potenzial nutzen, wäre eine erhebliche Menge an Wärmeenergie in der Trockenpartie einzusparen. Da die vorangestellte Betrachtungsweise eine rein physikalische ist, kann leider nicht prognostiziert werden, ob ein mechanisch dermaßen stark entwässertes Papier tatsächlich auch brauchbar wäre.

Fazit: Die Beschleunigung von 3000 g bei der WRV Bestimmung mit Hilfe einer Zentrifuge reicht bei weitem nicht aus, um alles mit mechanischen Mitteln entfernbare Wasser auch tatsächlich zu entfernen.

Vergleich der WRV-Werte konventionell und mit Hilfe von FXP bewertet

Tabelle1 in Energiebilanz 21v*10c

WRV kürz. in % = $129 + 0,76 \cdot x$

WRV fib. in % = $123,4 + 0,572 \cdot x$

WRV FXP k in % = $40,34 + 0,054 \cdot x$

WRV FXP f. in % = $41,84 + 0,09 \cdot x$

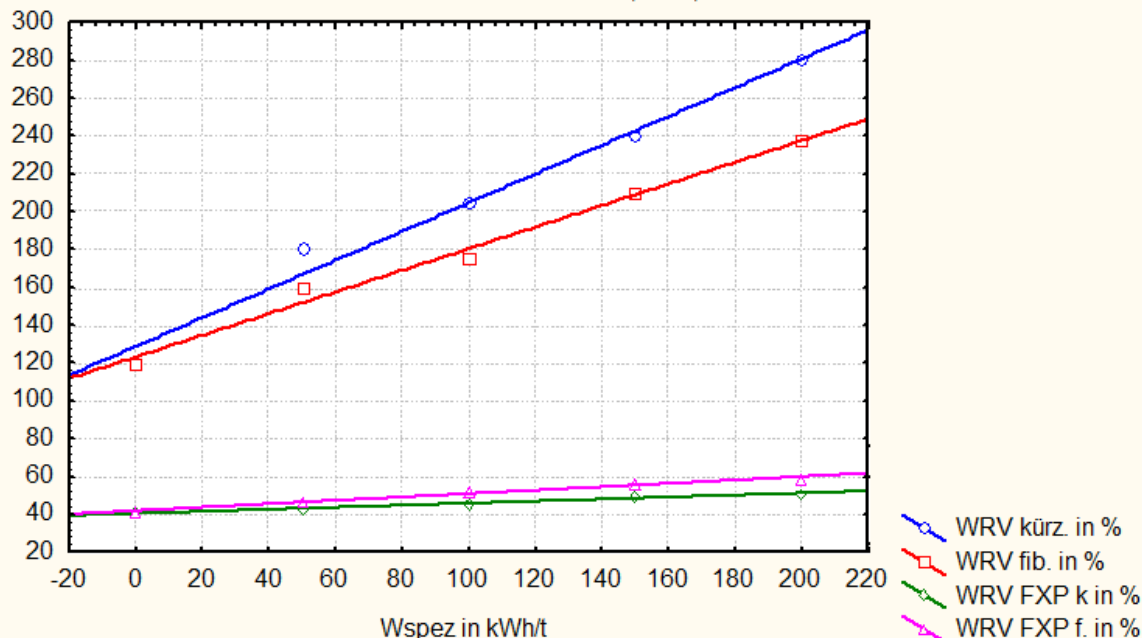


Abb. 6 Bewertung einer Mahlreihe mit dem klassischen WRV und dem Fiberexpress

Wendet man wesentlich höhere Zentrifugenbeschleunigungen an oder erzeugt die Triebkraft zur Entwässerung des Faserstoffes auf andere Weise, dann werden sehr hohe Endtrockengehalte von teilweise über 70 % erreicht. Das heißt, dass wesentlich weniger Wasser chemisch an den Faserstoff gebunden ist, als die bisherige Betrachtungsweise vermuten lässt.

2.3.6.2 Betrachtung der energetischen Effizienz der Mahlung auf der Basis des chemisch gebundenen Wassers

Der gleiche ungebleichte Kiefernulfatzellstoff, der vorhin bei der Ermittlung des WRV eine Rolle gespielt hat, wurde hinsichtlich der aufgenommenen Wassermenge untersucht. Die Basis des Vergleichs ist die Wassermenge des ungemahlten Zellstoffes. Die gemessenen und berechneten Daten sind in der nachfolgenden Tab. 5 angegeben.

Tab. 5 Daten zur Berechnung der energetischen Effizienz

	1 Wspez in kWh/t	2 SR kürzend	3 SR fibr.	4 WRV kürz. in %	5 WRV fib. in %	6 TGmax kürz. in %	7 TGmax Fib. in %	8 WRV FXP k in %	9 WRV FXP f. in %	10 Anteil Wasser k in kg/t	11 Anteil Wasser f in kg/t	12 Wassera ufnahme in kg/t k	13 Wassera ufnahme in kg/t f	14 Q verd in KJ k	15 Q verd. in KJ f	16 Wspez in kJ/t	17 W gesamt in KJ/t	18 Anteil an Wspez k	19 Anteil an Wspez f	20 Anteil an Wges k	21 Anteil an Wges f
1	0	13	13	120	120	71	71	40,8	40,8	290	290	0	0	0	0	0	0				
2	50	15	16	180	160	70	68	42,8	47	300	320	10	30	22580	67740	180000	1260000	0,1254	0,3763	0,01792	0,05376
3	100	44	24	205	175	69	66	44,9	51,5	310	340	20	50	45160	112900	360000	2520000	0,1254	0,3136	0,01792	0,0448
4	150	75	34	240	210	67	64	49	56,2	330	360	40	70	90320	158060	540000	3780000	0,1673	0,2927	0,02389	0,04181
5	200	86	50	280	238	66	63	51,2	58,7	340	370	50	80	112900	180640	720000	5040000	0,1568	0,2508	0,024	0,03584

Der Faserstoff wurde einmal fibrillierend gemahlen mit einer 60° Garnitur. Zum anderen wurde die Originalgarnitur der Firma Andritz eingesetzt, die wesentlich schmalere

Messer besitzt und einen Schnittwinkel von etwa 12° realisiert. Diese Garnitur ermöglicht eine sehr starke Faserkürzung. Die Tabelle zeigt die verwendete Mahlenergie auf der Basis des spezifischen Mahlarbeitsbedarfes, die erzielten SR Werte, das Wasserrückhaltevermögen, bestimmt nach der konventionellen Methode, die maximalen Trockengehalte, die im Fiberexpress realisiert wurden, das WRV für den Fiberexpress, dass sich aus diesen Trockengehalten ergibt und den Anteil chemisch gebundenen Wassers in Kilogramm bezogen auf eine Tonne Faserstoff. Der gemahlene Faserstoff kann 290 kg Wasser chemisch binden. Diese Wassermenge dient als Basis für die Berechnung der Daten der Wasseraufnahme, die infolge Mahlung stattgefunden hat. Diese Wassermenge ist in den Spalten 12 und 13 ausgewiesen. „f“ steht für fibrillierende Mahlung, „k“ für faserkürzende Mahlung. Man erkennt, dass der Faserstoff maximal 50-80 kg Wasser zusätzlich durch die Mahlung aufnehmen kann. Die fibrillierte Faser bindet in jedem Falle mehr Wasser als das gekürzte Pendant. Die Spalten 14 und 15 zeigen berechnete Wärmemenge für die Verdampfung des zusätzlich gebundenen Wassers. Dabei wird von Atmosphärendruck ausgegangen und einer spezifischen Verdampfungswärme von 2258 kJ/kg. Die Spalten 16 und 17 zeigen den massebezogenen mittleren Mahlarbeitsbedarf bzw. den gesamten Energiebedarfs der sich aus der Gesamtleistungsaufnahme des Refiners berechnet. Will man nun die energetische Effizienz des Mahlprozesses einschätzen, dann ist es sinnvoll, diese Bilanzierung auf der Basis der gesamten elektrischen Arbeit vorzunehmen (Werte in Spalte 17). Es zeigt sich, dass bei einer faserkürzenden Mahlung 1 % bis 2 % der eingesetzten Energie tatsächlich zur Faserbearbeitung benutzt worden sind. Die fibrillierende Mahlung setzt die aufgewendete Energie etwa zwei- bis dreimal so effizient um. Die Aussage der Tab. 5 ist in der nachfolgenden Abb. 7 nochmals grafisch dargestellt. Den physikalischen Sachverhalt geben die beiden unteren Kurven im Bild, die sich auf die gesamte geleistete Arbeit beziehen, am besten wieder. Man erkennt, dass die energetische Effizienz der fibrillierende Mahlung besser ist als die der Faserkürzung.

Fazit: *In der Literatur wird oft über die energetische Effizienz der Mahlung diskutiert. Methoden, diese physikalisch nachvollziehbar zu bewerten, werden nicht angeboten. Durch die sehr gründliche Wasserentfernung im Fiberexpress steht nunmehr erstmalig eine Methode zur Verfügung, die diesen Zustand beendet. Damit ist eine physikalisch exakte Bilanzierung möglich, die auch auf industrielle Prozesse anwendbar ist.*

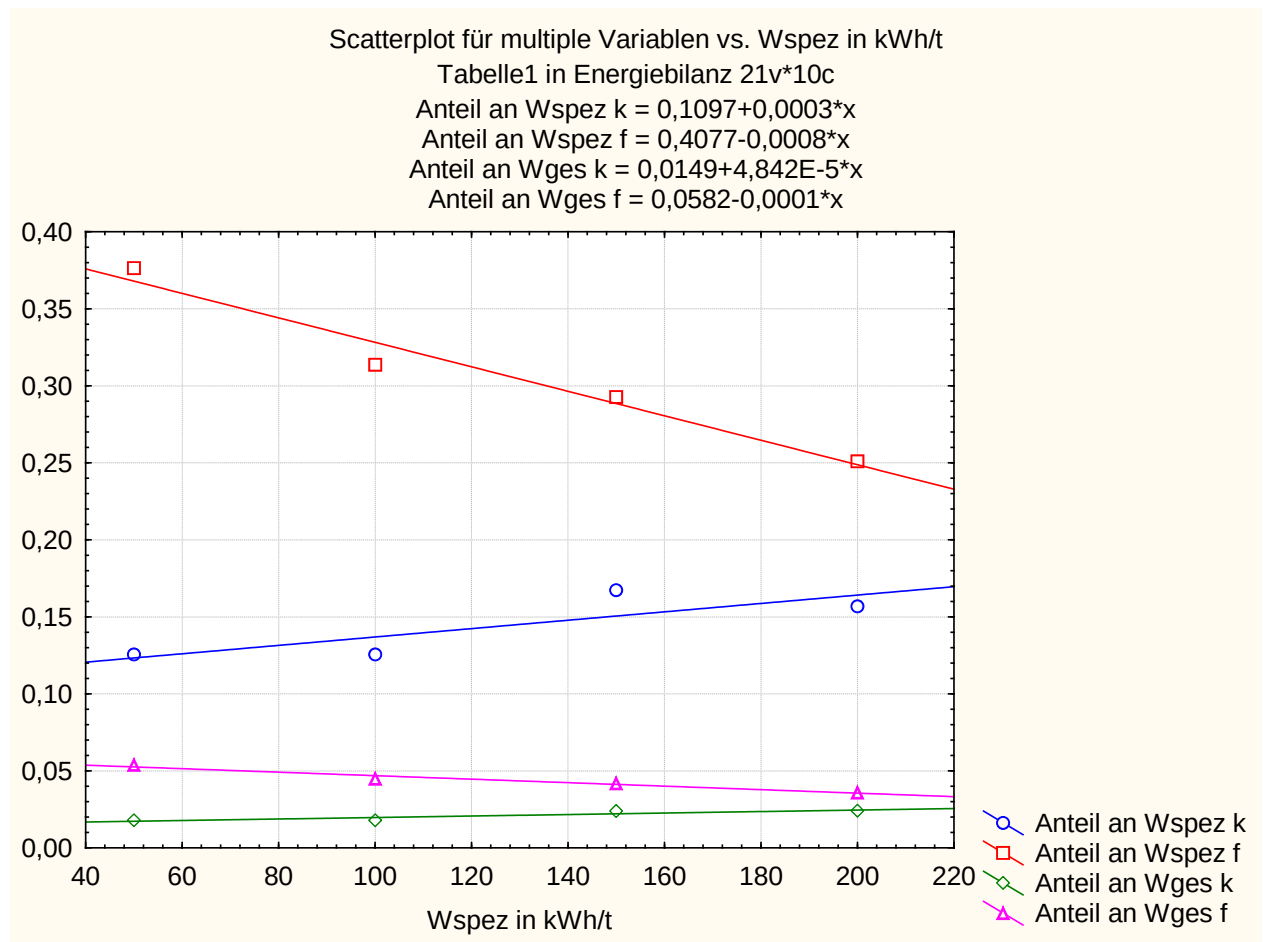


Abb. 7 Energetische Effizienz der Labormahlung auf der Basis von w_{spez} und w_{ges}

2.3.6.3 Untersuchungen an DIP-Stoff

Nach dem die Entwässerung von gemahlene Zellstoffen mit Hilfe des Fiberexpress selbst bei sehr hohen SR- Werten von 90+ problemlos funktionierte, begannen die Untersuchungen an Substraten aus Altpapierstoff. Zielstellung war es zu klären, ob der hohe Pigmentgehalt das Untersuchungsergebnis beeinträchtigt oder beispielsweise zum Verschluss des Siebes oder der Spritzenkanüle führen könnte. Die Untersuchungen ergaben, dass sich auch Altpapiersubstrate problemlos mit dem Fiberexpress entwässern lassen.

Da als Gesamtprozess die Herstellung von LWC-Papier hinsichtlich ihrer energetischen Effizienz bewertet werden sollte, wurde ein Mustersubstrat aus einer Mischung von Zeitungen und Zeitschriften hergestellt. Die Mischung variiert jeweils von 0 % bis 100 % bzw. umgekehrt. In der Abb. 8 ist dargestellt, wie sich dieses Gemisch hinsichtlich des maximal erreichbaren Trockengehaltes und des Wasserrückhaltevermögens verhält. Für die Bewertung der energetischen Effizienz der Mahlung wird eine für DIP-Stoff typische Mischung aus 50 % Zeitungen und 50 % Zeitschriften zu Grunde gelegt. Die Werte, die man für die Berechnung der energetischen Effizienz der Mahlung dieses Stoffes benötigt, sind direkt aus der Abb. 8 zu entnehmen (70 % Trockengehalt und 41 % WRV).

Betrachtet man den Trockengehalt, so zeigt sich, dass Zeitungen sich schwerer entwässern lassen als Zeitschriften. Der maximal mögliche Trockengehalt, der hier erreicht wurde, liegt bei ca. 63 %. Erhöht man den Anteil an Zeitschriften in der Mischung, dann entwässert der Gesamtstoff wesentlich besser und bei einem Anteil von 100 % Zeitschriften erreicht man Endtrockengehalte von 73 %. Die Ursache für dieses Verhalten der Fasermischung wird darin gesehen, dass der Anteil mineralischer Additive in den Zeitungen nur etwa halb so hoch ist (12 %), wie in den Zeitschriften (23 %). Da die mineralischen Additive praktisch kein Wasser binden, entwässert die Suspension aus Zeitschriften besser. Man kann für Trockengehalte, WRV und Feuchtegehalt der Mischung in guter Näherung einen linearen Verlauf annehmen. Das Wasserrückhaltevermögen erreicht für die Suspension aus Zeitungen den höchsten Wert mit 60 %. Mischt man Zeitschriften dazu, dann sinkt dieser Wert bis auf ca. 37 % ab. Diese Werte sind sicher etwas ungewöhnlich für all diejenigen, die bei der konventionellen WRV-Bestimmung Werte um 100-120 % erwarten. Es hat sich gezeigt, dass auch bei Altpapiersubstraten viel weniger Wasser chemisch gebunden ist, als bisher vermutet.

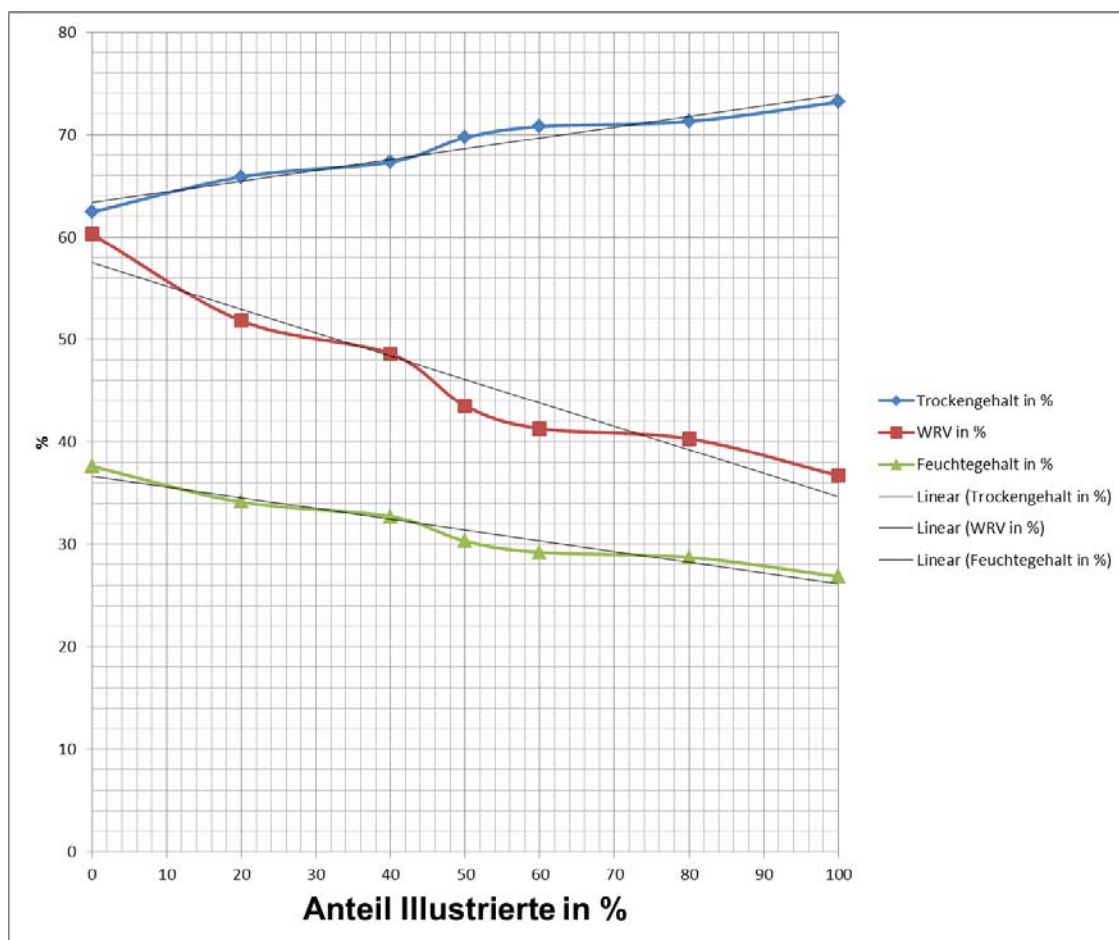


Abb. 8 Entwässerungsversuche an einer Mischung von Zeitungen und Zeitschriften

3 Energieverbrauch in heutigen Stoffaufbereitungen

Der spezifische Energiebedarf in der Stoffaufbereitung für die Herstellung grafischer Papiere auf Basis von Altpapier ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Einerseits bestimmt die angestrebte Qualität des Produktes Papier das Maß der Aufbereitung des Altpapierstoffes und damit den Energiebedarf. Andererseits haben sich mit fortschreitender Technologieentwicklung auch der Wirkungsgrad der einzelnen Aggregate in der Stoffaufbereitung sowie die Prozesskonzepte verbessert, was ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf hat. Entgegen früheren Anlagenkonzepten für die Produktion von LWC-Papier, bei denen neben Altpapier auch Primärfaserstoffe eingesetzt werden mussten, kann heutzutage die Produktion von LWC-Papier mit ausschließlich Altpapier als Faserstoffquelle realisiert werden (14).

Nachfolgend ist ein vereinfachtes Prozesskonzept für die Stoffaufbereitung von grafischem Altpapier aus Haushaltnaher Erfassung (Zeitschriften und Magazinen) zur Produktion höher-wertigem grafischem Papier dargestellt. Der spezifische Energiebedarf setzt sich aus dem Bedarf an Elektroenergie für die einzelnen Aggregate und die Pumpen sowie aus dem Bedarf an Dampfenergie für die Dispergierung zusammen. Der spezifische Energiebedarf an Energie bezieht sich auf die Energie, die das jeweilige Aggregat dem Stromnetz bzw. Dampfnetz entzieht sowie auf die produzierte Menge an Papier (Ofentrockener Feststoff).

Der Bedarf an Elektroenergie in der Stoffaufbereitung kann mit 380 kWh/t abgeschätzt werden (Abb. 9). Für die Dispergierung bei einer Stoffdichte von 35 % wird je Dispergierstufe eine Dampfmenge von ca. 220 kg/t Stoff benötigt, was einem spezifischen Energiebedarf von ca. 150 kWh/t entspricht. Der Gesamtenergiebedarf einer Stoffaufbereitungsanlage zur Produktion höherwertiger grafischer Papiere aus Altpapier beträgt damit ca. 680 kWh/t. (15)

4 Trockensortierung von Altpapier

Das im Projekt untersuchte Verfahren zur Abtrennung der Druckfarben basiert auf dem Einsatz von Polymer-Granulat in der Suspension. Der Zugabe des Polymer-Granulat (Größe ca. 2 - 3 mm) erfolgt dabei im Stofflöser. Das Polymer-Granulat soll nach dem Stofflöser von der Faserstoffsuspension wieder abgetrennt werden, um nach einer Regeneration für einen erneuten Einsatz als Druckfarbensammler zur Verfügung zu stehen.

Für die Abtrennung des Polymer-Granulat sind konventionelle Verfahren denkbar wie Siebsortierer oder Hydrozyklone. Problematisch ist jedoch dabei, dass bei der Abtrennung des Polymer-Granulat gleichzeitig auch herkömmliche Rejektstoffe mit abgetrennt werden und damit beide Komponenten in einer Fraktion vorliegen würden. Eine Separation des Polymer-Granulat aus der Rejektfraktion würde insbesondere durch die Anwesenheit von Kunststoffrejekten erschwert werden.

Ein Ansatz ist es daher, vor der Zugabe des Altpapiers in den Stofflöser die papierfremden Bestandteile in einer Trockensortierung aus dem Altpapier abzutrennen. Die PTS wurde daher von der führenden Forschungsstelle gebeten, die Möglichkeiten und Grenzen für die Abtrennung papierfremder Bestandteile, insbesondere von Kunststoffen, in einer der Stoffaufbereitung vor gelagerten Trockensortierung zu bewerten. Die Fragestellung der Abtrennung des Polymer-Granulats aus der Faserstoffsuspension ist nicht Bestandteil der nachfolgenden Ausführungen und wird in einem separaten Projekt an der führenden Forschungsstelle untersucht.

In Aufbereitungsanlagen zur Trockensortierung von Altpapier werden aus einer gemischten Altpapierfraktion, die aus Verpackungspapieren, grafischen Papieren, Spezialpapieren und papierfremden Stoffen besteht, verschiedene Altpapiersorten der unteren Sortengruppe erzeugt. Die Einteilung der Altpapiere erfolgt gemäß der Liste der europäischen (CEPI / B.I.R.) Standardsorten. Die mit einem Anteil von zusammen ca. zwei Drittel mengenmäßig bedeutsamsten Altpapiersorten,

- Deinkingware (1.11),
- Kaufhausaltpapier (1.04),
- Sortiertes gemischtes Altpapier (1.02) und
- Unsortiertes gemischtes Altpapier (1.01),

zählen zur „Gruppe 1 - Untere Sorten“ der europäischen Standardsortenliste. Neben der Erzeugung der verschiedenen Altpapiersorten ist auch die Entfernung von papierfremden Stoffen aus dem Altpapier eine Aufgabe der Trockensortierung.

Der Erlös für die Altpapiersorte Deinkingware (1.11) liegt ca. 20 % bis 30 % über dem Erlös der Altpapiersorten 1.04 bzw. 1.02. Zielstellung für den Betreiber einer Trockensortieranlage ist es daher, möglichst viel Deinkingware aus der gemischten Altpapierfraktion in die Altpapiersorte Deinkingware (1.11) zu überführen.

In Deutschland ist im Jahr 2010 eine Altpapiermenge von 13,7 Mio. t getrennt gesammelt angefallen, wobei 7,6 Mio. t auf die gewerbliche Erfassung und 6,1 Mio. t auf die haushaltsnahe Erfassung entfallen sind (16). Der überwiegende Anteil haushaltsnah erfasster Altpapiere wird vor dem Wiedereinsatz einer Sortierung unterzogen. Bei dem gewerblich erfassten Altpapier wird gemischtes Altpapier einer Sortierung zugeführt wohingegen Kaufhausaltpapier oder beispielsweise Akten keiner Sortierung bedürfen.

Haushaltnah erfasstes Altpapier (gemischte Ware) weist üblicherweise folgende Zusammensetzung auf:

- 75 % grafische Papiere,
- 25 % Verpackungspapiere,
- 5 % papierfremde Bestandteile, Spezialpapiere.

Die Bandbreite der Anteile verschiedener Komponenten des haushaltnah erfassten Altpapiers ist in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. (17)

Tab. 6 Zusammensetzung von haushaltnah erfasstem Altpapier (gemischte Ware), Bandbreite (17)

Fraktion	Min in %	Max in %
Grafisches und sonstiges Papier	57	83
Verpackungspapier	14	40
Tapeten	0	5
Fremdmaterialien	2	4

4.1 Aufbereitungsanlagen zur Trockensortierung von Altpapier

Die Altpapiersortierung erfolgte anfangs lediglich durch eine manuelle Sortierung des Altpapiers zur Generierung der Altpapiersorten. Mit der Zeit wurden weitere mechanische und sensorgestützte Verfahrensschritte zur automatischen Sortierung von Altpapier eingeführt.

Der Grad der Automatisierung in einer Trockensortieranlage hängt von der Zusammensetzung des Input-Materials sowie der angestrebten Sortiereffizienz ab. Wird beispielsweise das Papier aus einer gemischten Abfallsammlung sortiert (Bsp.: DSD-Sortierung in Deutschland, „Co-mingled“ Sammlung in England), so ist hier ein erhöhter Aufwand an Sortiertechnologie notwendig.

Ist hingegen das Input-Material ein getrennt erfasstes Altpapier, aus dem geringe Mengen unerwünschter Stoffe entfernt und das Altpapier in grafische und Verpackungspapiere aufgeteilt werden sollen, so ist der Sortieraufwand geringer.

Gemäß dem Stand der Technik umfasst die Aufbereitung von Altpapier durch Trockensortierung vier Schritte ():

- **Beschickung der Anlage**
Im ersten Schritt erfolgt die Beladung der Anlage mit Altpapier, wobei ein konstanter Materialfluss garantiert werden muss.
- **Mechanische Sortierung**
In diesem Schritt werden die Materialien nach ihren physikalischen Eigenschaften (Form, Größe, Steifigkeit,...) separiert.
- **Sensorgestützte Sortierung**
In einem dritten Schritt werden durch sensorgestützte Sortierung (Automatisches Klauben) unerwünschte Materialien ausgeblasen.
- **Manuelle Sortierung**
Als letzter Schritt erfolgt eine manuelle Sortierung, bei der unerwünschte Materialien abgetrennt werden bzw. eine Qualitätssicherung erfolgt.

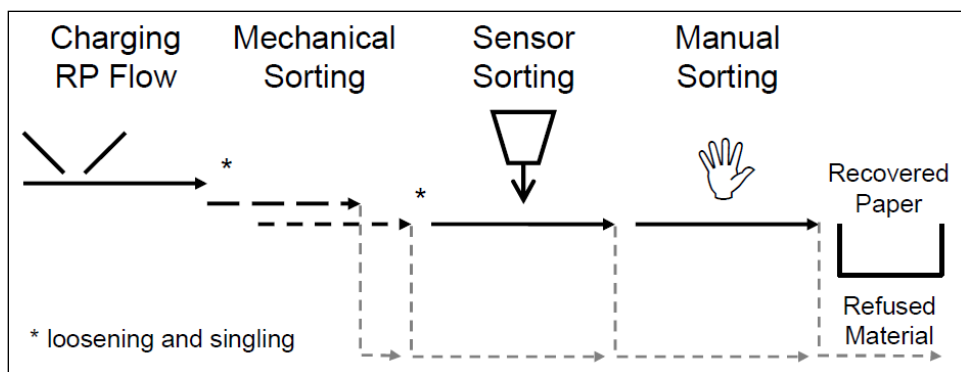


Abb. 10 Prinzipskizze der Trockensortierung von Altpapier (18)

Kennzeichnend für Trockensortieranlagen zur Gewinnung von Deinkingware (1.11) ist, dass die Sorte Deinkingware durch Negativsortierung gewonnen wird. Das heißt, dass dem überwiegend aus grafischen Papieren bestehendem Input-Material (siehe auch Tabelle 1) die Verpackungspapiere und papierfremde Bestandteile entzogen werden, um möglichst viel grafisches Papier in die Deinkingware zu überführen.

Neben der Altpapiersorte Deinkingware (1.11) wird auch die Altpapiersorte Kaufhausaltpapier (1.04) durch Aussortieren von Verpackungspapieren (Pappen und Kartonagen) erzeugt.

Eine weitere generierte Altpapiersorte ist Sortiertes gemischtes Altpapier (1.02), in der Verpackungspapiere und maximal 40 % Zeitungen und Illustrierte enthalten sind. Lässt die Marktsituation es zu, so kann das Altpapier ohne Sortierung in Ballen gepresst und als Unsortiertes gemischtes Altpapier (1.01) verkauft werden.

Im Folgenden soll auf die einzelnen Aggregate innerhalb der Sortierschritte von Trockensortieranlagen für die Gewinnung von Deinkingware näher eingegangen werden.

Manuelle Sortierung

Der historisch gesehen erste Prozessschritt der Altpapiersortierung ist die manuelle Sortierung gewesen, so dass dieser hier als erstes beschrieben werden soll, auch wenn die manuelle Sortierung in heutigen Sortieranlagen meist am Ende der Prozesskette zu finden ist.

Anlagen mit ausschließlich manueller Sortierung weisen den geringsten Automatisierungsgrad auf. Dabei wird das Altpapier bei Anlieferung hinsichtlich der Überführung in eine der verkaufsfähigen Altpapiersorten bewertet und entschieden, ob eine Sortierung des Altpapier notwendig ist oder eine direkte Verpressung durchgeführt werden kann.

Das Altpapier, das eine Sortierung erfordert, wird zur Auflockerung und Vereinzelung einem Steigband zugeführt, das auf ein Sortierband fördert. Von diesem Sortierband entfernt das Sortierpersonal durch Negativsortierung dem Altpapierstrom Verpackungspapiere, Spezialpapiere und Papierfremde Bestandteile, so dass am Ende des Sortierbandes die Sorte Deinkingware anfällt. Dabei arbeiten meist zwei oder mehr Sortierer in Reihe an einem Sortierband.

Neben den hohen Kosten für Personal ist mit der manuellen Sortierung eine hohe körperliche Belastung beim Sortierpersonal verbunden. Die Sortierleistung je Sortierer kann mit 0,5 bis 1 t pro Stunde abgeschätzt werden. (17)

Sortieranlagen mit ausschließlich manueller Sortierung sind in Deutschland kaum noch vorzufinden. Allerdings wird immer noch eine manuelle Sortierung in den meisten Sortieranlagen als ein letzter qualitätssichernder Prozessschritt installiert.

Beschickung der Anlage

Altpapier wird meist in loser Form zur Trockensortieranlage geliefert, kann aber auch in Paketen/Ballen oder Säcken angeliefert werden. Für letztere ist eine Vorzerkleinerung durch Ballenbrecher oder Sacköffner notwendig.

Die Beschickung der Trockensortieranlage erfordert eine Vergleichmäßigung des Altpapierstromes in einen bestimmten Volumenstrom bzw. eine bestimmte Schichtdicke. Dazu können verschiedene Beschickungsvorrichtungen eingesetzt werden:

- Trommel-Beschickung (Abbildung 3)
- Vibrations-Beschickung
- Steigband-Beschickung (Abbildung 4)
- Steigband-Beschickung mit rotierender Trommel

Bei der Trommel-Beschickung wird der Altpapierstrom unter einer Trommel hindurch befördert, wobei die Höhe des Altpapierstromes durch die Trommel limitiert wird.

Bei der Steigband-Beschickung wird eine größere Menge Altpapier auf ein schräges Förderband gegeben, bei dem ab einer gewissen Schichtdicke die oberste Altpapierschicht herunterrutscht. Diese beiden Verfahren können auch in Kombination angewandt werden.



Abb. 11 Trommel-Beschickung (19)



Abb. 12 Steigband-Beschickung (20)

Mechanische Sortierung

Die mechanische Sortierung kann in Grob- und Feinsiebung unterschieden werden. Darüber hinaus existieren noch Sonderkonstruktionen wie der Paperspike.

Bei einer Grobsiebung werden große Teile wie Pappen und Kartonagen über das Sieb hinweg an das Ende des Siebes gefördert. Die gewünschte Deinkingfraktion fällt hingegen durch das Sieb hindurch.

Bei der Feinsiebung ist das Sortierkriterium, das heißt die Größe der Sieböffnungen, wesentlich kleiner. Hier wird die gewünschte Deinkingfraktion an das Ende des Siebes gefördert und kleine Teile ($< 100 \mu\text{m}$) wie Knüllpapier fallen durch das Sieb hindurch.

Sowohl für die Grobsiebung als auch die Feinsiebung können folgende Aggregate bzw. Verfahren eingesetzt:

- Scheibensiebe,
- Sternsiebe,
- Trommelsiebe,
- Vibrationssiebe,
- Spaltsiebung,
- Deinkingsieb
- Ballistikseparatoren

Bei Scheiben- und Sternsieben sind mehrere mit Scheiben bzw. Sternen besetzte Wellen hintereinander angeordnet. Der Materialstrom wird durch die Rotation der Wellen transportiert.

Die Trommelsiebe sind Stahlzylinder mit Sieböffnungen in der Wandung. Der Transport des Altpapiers wird durch die Rotation und die Neigung des Stahlzylinders realisiert.

Vibrationssiebe besitzen Siebplatten, die zum Transport des Materials eine gewisse Neigung aufweisen und in Vibration versetzt werden.

Bei der Spaltsiebung werden zwei Förderbänder in einem bestimmten Abstand (Spaltmaß) und mit bestimmten Geschwindigkeiten hintereinander geschaltet.

Das Deinkingsieb verfügt über mehrere perforierte Walzen, wobei an einem Teil des Walzenumfangs ein Vakuum angelegt wird. Steife und grobe Bestandteile des Altpapiers werden nicht angesaugt und an das Ende Siebes befördert. Die angesaugten Bestandteile fallen im unteren Teil der Walze, wo kein Vakuum mehr anliegt, ab und fallen somit durch das Sieb hindurch.

Die Ballistikseparatoren verfügen über kreisförmig bewegte Siebe. Die kreisförmige Bewegung wird meist durch Exzenterkurbelwellen erzeugt und dient der besseren Siebung des Materials und dem Materialtransport. (17)



Abb. 13 Scheibensieb (21)



Abb. 14 Sternsieb (22)



Abb. 15 Trommelsieb (23)

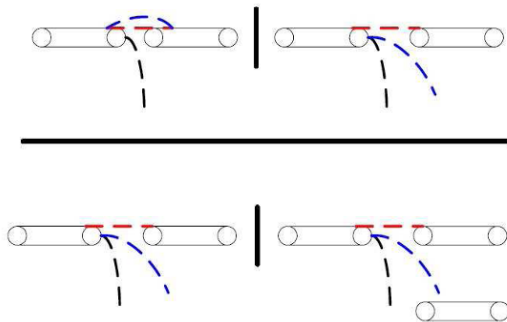


Abb. 17 Spaltsiebung (17)

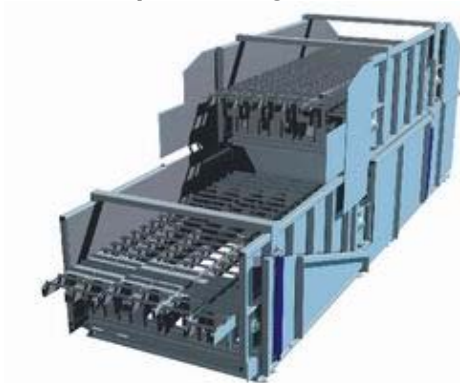


Abb. 19 Ballistikseparator (25)



Abb. 16 Vibrationssieb (24)



Abb. 18 Deinkingsieb (17)



Abb. 20 Paperspike (19)

Neben Siebaggagaten zur Grob- und Feinsortierung kann außerdem ein so genannter Paperspike eingesetzt werden. Bei diesem sind auf Bändern (Abb. 20) oder einer Walze mehrere Spitzen mit kleinen Widerhaken angebracht. Das Altpapier wird als eine Schicht vereinzelt dem Aggregat zugeführt. Steife Materialien wie Wellpappen oder Karton werden an den Spikes aufgespießt und können so separat ausgeschleust werden. Weniger steife Materialien werden lediglich verformt oder aufgeschlitzt aber nicht aufgespießt.

Sensorgestützte Sortierung

Insbesondere die Technologie des automatischen Klaubens in Form der sensorgestützten Sortierung erfährt derzeit eine intensive Entwicklung bei verschiedenen Recyclingapplikationen. Die Sortierung erfolgt dabei durch die Ausnutzung stoffspezifischer

scher physikalischer Eigenschaften (bspw. Strahlungsemission, -reflexion, -absorption) und dem Auswurf durch Druckluftdüsen. (26)

Als Sensorsysteme können sowohl NIR-Kameras (Nah-Infrarot) als auch VIS-Kameras (Video) eingesetzt werden. Mit diesen Systemen lassen sich verschiedene papierfremde Bestandteile wie Kunststoffe, Textilien (Synthetik- und Naturfasern), Holz oder organische Abfälle erfassen. Auch können verschiedene Papiersorten (durchgefärbte oder beschichtete Papiere, Papiere mit unterschiedlichen Druckverfahren) erkannt werden. Mittels Luftdüsen können als ungeeignet identifizierte Teile ausgeblasen werden. Problematisch sind allerdings schwere Teile, so dass vor einer sensorgestützten Sortierung immer eine Grobsiebung angeordnet sein sollte.

Die Kombination von NIR Technologie mit VIS Technologie hat zu einer starken Verbesserung der Sortiereffizienz geführt. Durch die Kombination von mehreren Sensorsystemen in einer Anlage kann die Ausschleusung unerwünschter Stoffe aus dem Altpapierstrom entscheidend verbessert werden.

Generell ist der Grad der Ausschleusung von Papierfremden Stoffen aus dem Altpapierstrom von dem Durchsatz der Anlage abhängig. Erfolgt ein „Überfahren“ der Anlage, wird also der Durchsatz der Anlage durch Erhöhung der Förderbandgeschwindigkeit über den für die Anlage empfohlenen Durchsatz erhöht, sinkt die Reinheit des sortierten Altpapierstromes.

	
Abb. 21 NIR-Kamera des Sensorsystems „Unisort SORT IT“ (27)	Abb. 22 Sensorsystem „Unisort SORT (27)

Eine weitere Entwicklung zum automatischen Klauben sind Sortierroboter (Abb. 23). Bei diesen werden mit Spektrometern die Daten (Werkstoff, Farbe, Kontur) von vorbeifahrenden Objekten erfasst und diese mittels Saugnapfen, die an Servomotorbetriebenen Armen montiert sind, aussortiert. Die Eignung dieser Aggregate ist allerdings für größere Mengenströme meist unzureichend, so dass diese Aggregate derzeit nicht dem Stand der Technik entsprechen.

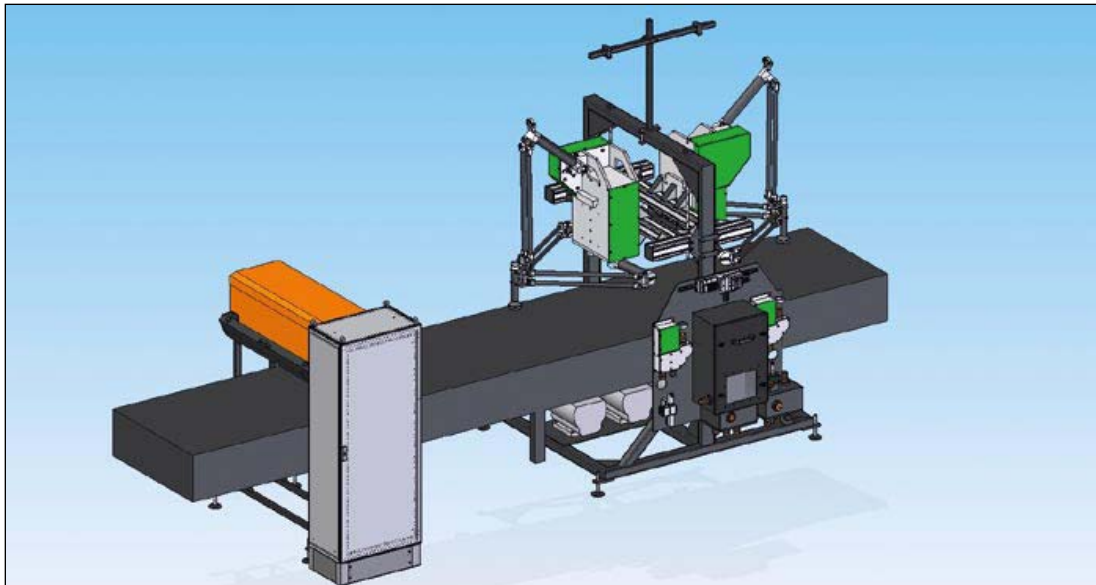


Abb. 23 Robotersortiereinheit für die Trockensortierung von Altpapier (27)

4.2 Anteil papierfremder Bestandteile und brauner Papiere in der Deinkingware nach Trockensortierung

In einer Erhebung der TU Darmstadt wurde in verschiedenen europäischen Ländern der Anteil an Verpackungspapieren, zur Papierherstellung ungeeignete Papiere sowie Papierfremde Bestandteile bestimmt. (28) Für Deutschland (DE) wurden dazu 42 Trockensortieranlagen ausgewertet. Der massenbezogene Anteil an papierfremden Bestandteilen in der Deinkingware (1.11) ist im Mittel in Deutschland kleiner als 1 %. Der Anteil brauner Papiere beträgt in Deutschland in der Deinkingware durchschnittlich 5 %. (Abbildung 16).

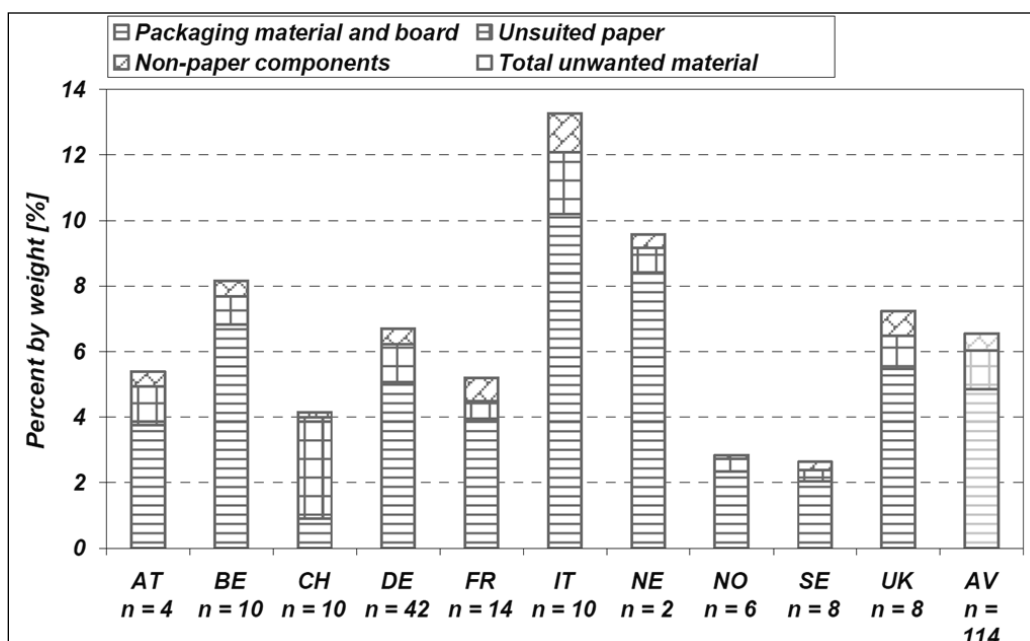


Abb. 24 Zusammensetzung der Bestandteile an unerwünschten Stoffen in der Deinkingware für Altpapiersortieranlagen in verschiedenen europäischen Ländern (28)

Ähnliche Ergebnisse wurden in einem Projekt an der Papiertechnischen Stiftung (29) durch NIR-Messung am Altpapierstrom von zwei Papierfabriken zur Produktion von

grafischen Papieren gefunden. Der Anteil an Kunststoffen im Altpapier wurde hier mit ca. 0,5 bis 1 % sowie der Anteil an anorganischen Stoffen (Glührückstand 525°C) mit durchschnittlich 30 % bestimmt. (Abb. 25)

AP-Zusammensetzung aus NIR-Werten in %	Papierfabrik 1	Papierfabrik 2
Verhältnis Zeitungen / Zeitschriften	50 / 50	25 / 75
Deinkingpapiere	93	95
Verpackungspapiere	7	4
Kunststoffe	0,5	1
Glührückstand 525°C	27	31

Abb. 25 Zusammensetzung des grafischen Altpapiers in zwei deutschen Papierfabriken zur Produktion grafischer Papiere (28)

Im europäischen Forschungsprojekt SORT-IT (30) wurde eine Trockensortieranlage hinsichtlich der sensorgestützten Sortierung optimiert (Abb. 26). Die manuelle Sortierung (Sortierkabinen und manuelle Qualitätskontrolle) wurde durch zwei Sensorsysteme (UniSORT IT) und einen Sortierroboter ersetzt.

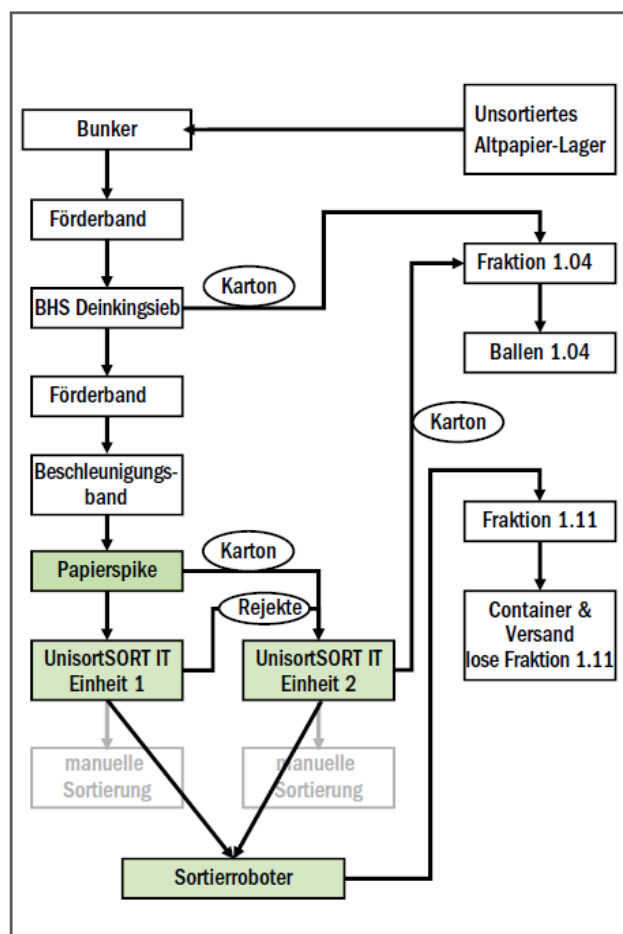


Abb. 26 Sortierkonzept für die Trockensortierung von Altpapier (27)

In einem 3-tägigen Demonstrationsversuch konnte mit dieser Pilotanlage eine Deinkingfraktion (1.11) mit einem Anteil von weniger als 0,5 % papierfremder Stoffe produziert werden (Abbildung 19). Für jede Probe wurde dabei eine Menge von 150 bis 250 kg Altpapier händisch sortiert, insgesamt eine Menge von ca. 4 Tonnen.

In einem weiteren Großversuch wurde eine Menge von 2000 Tonnen Altpapier der Sorte 1.11 produziert, die einen Anteil papierfremder Stoffe von 0,45 % enthielt.

Das Potenzial für eine weitere Optimierung der Trockensortierung von Altpapier hinsichtlich einer Reduzierung des Anteils papierfremder Stoffe wird als gegeben angesehen. (31)

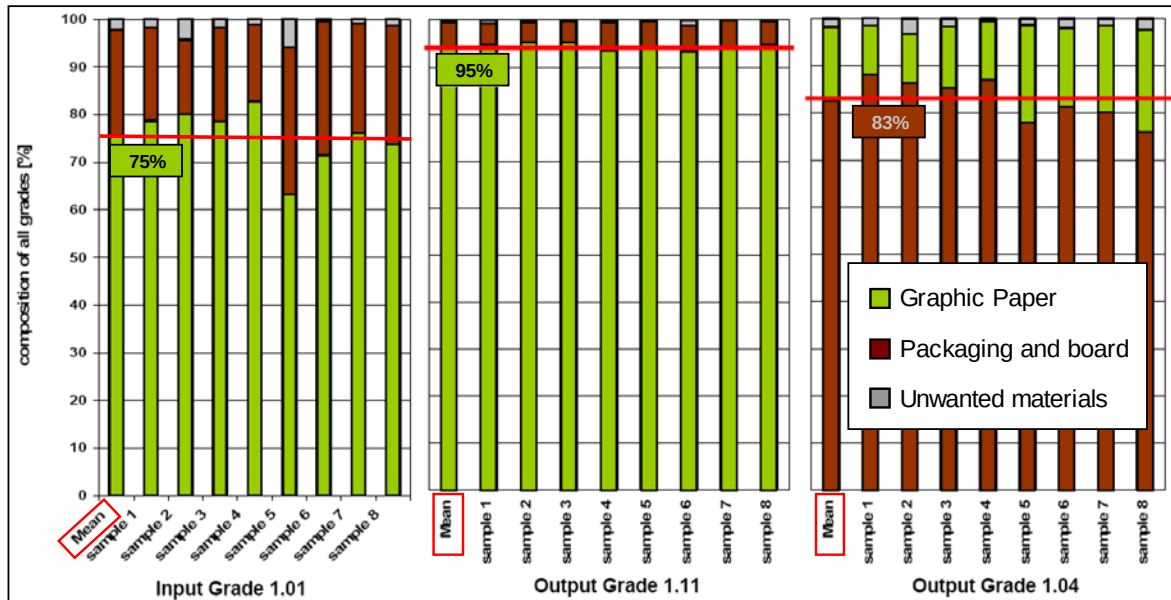


Abb. 27 Zusammensetzung des Input (Altpapiersorte 1.01) und Output (Altpapiersorten 1.04 und 1.11) einer Trockensortieranlage, 3-tägiger Demonstrationsversuch mit Pilotanlage (31)

In einer Arbeit an der TU Darmstadt (17) wurde durch die Befragung von Betreibern von Altpapiersortieranlagen verschiedene Sortiertechniken hinsichtlich der Abtrennung von papierfremden Bestandteilen bewertet. In Abb. 28 sind die Anteile an Papierfremden Bestandteilen sowie Verpackungspapieren in der sortierten Altpapiersorte 1.11 (Deinkingware) aufgeführt.

Dabei ist zu erkennen, dass insbesondere durch eine Sortierung des Altpapierstromes mit sensorgestützter Erkennung eine sehr gute Reduktion von Papierfremden Bestandteilen möglich ist. Die manuelle Sortierung kann disbezüglich ebenfalls eine Reduktion auf unter 0,5 % erzielen.

Die Sortiertechnologie Papierspike kann den Anteil an Verpackungspapieren auf unter 2 % senken und wird zunehmend einer sensorgestützten Erkennung nachgeschaltet, um insbesondere weiß gedeckte Verpackungspapiere wie z. B. Pizzaschachteln, die von der sensorgestützten Erkennung nicht ausgeschleust werden, zu entfernen.

Die Luftstromsortierung in Aerozyklonen entspricht bei der Trockensortierung von Altpapier nicht dem Stand der Technik. Diese Technik wird derzeit nur in einer einzigen Anlage in Deutschland (Trie-Inking) realisiert und bedarf einer Vorbehandlung in Form einer Zerkleinerung des Altpapiers. Die mit dieser Sortiertechnik erzielbare Reduktion an Verpackungspapieren in der Deinkingware ist aber größer als bei anderen Sortiertechniken. Im Kapitel 4.2.2 wird daher ausführlicher auf diese Anlage eingegangen.

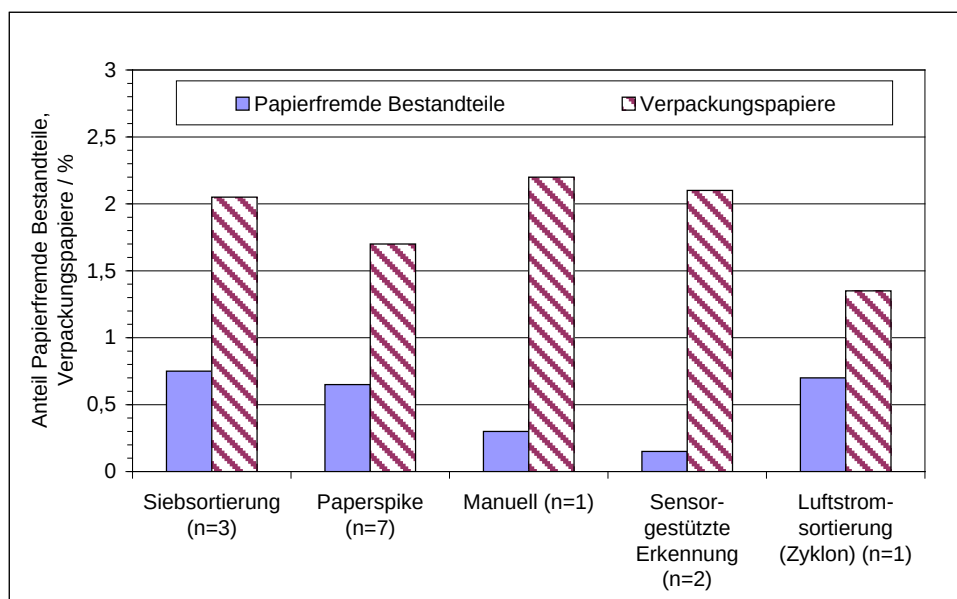


Abb. 28 Zusammensetzung von Deinkingware nach der Sortierung in verschiedenen Altpapiersortieranlagen (17)

4.2.1 Abschätzung des spezifischen Energiebedarfs sowie weiterer Kostenfaktoren in Trockensortieranlagen

In einer Trockensortieranlage wird elektrische Energie für

- die Förderung des Materialstromes,
- Mechanische Aggregate,
- Sensorgestützte Aggregate inkl. Druckluftbereitstellung für Ausblasen,
- Staubabsaugung / Reinigung und
- die Ballenpresse

benötigt.

Die Anzahl und damit der Bedarf an Elektroenergie für sensorgestützte Aggregate hängen vom Grad der Automatisierung der Trockensortieranlage ab. Je höher die Anforderung an die Reinheit des Altpapierstromes ist, desto mehr sensorgestützte Aggregate sind erforderlich.

Die Installation einer Staubabsaugung bzw. Reinigungsanlage ist nicht bei allen Anlagentypen erforderlich.

Die Ballenpresse wird oft nur für die Pressung der Altpapiersorte 1.02 bzw. 1.04 genutzt, so dass nur 30 % des gesamten Materials in Ballen gepresst wird.

In Tab. 7 sind der spezifische Bedarf an Elektroenergie für die verschiedenen Bereiche einer Trockensortieranlage aufgeführt. Daraus ergibt sich ein spezifischer Energiebedarf bei der Trockensortierung von Altpapier zur Gewinnung von Deinkingware von 16 kWh/t Trockenmasse Altpapier.

Tab. 7 Spezifischer Energiebedarf bezogen auf Input-Material in einer Trockensortieranlage zur Generierung von Deinkingware, Durchsatz ca. 22 t/h

Bezeichnung	Spezif. Energiebedarf
Förderbänder und Siebe	4 kWh/t
NIR Technologie	3 kWh/t
Kompressor für Ausblasen	3 kWh/t
Staubabsaugung / Reinigung	2 kWh/t
Ballenpresse	5 kWh/t
SUMME	16 kWh/t

Neben Elektroenergie existieren in Trockensortieranlagen weitere Kostenfaktoren:

- Betrieb von Beschickungsfahrzeugen,
- Personal für händische Sortierung sowie
- Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR).

Die händische Sortierung entspricht dabei sowohl in Anlagen mit geringem als auch mit hohem Automatisierungsgrad dem Stand der Technik.

4.2.2 Trie-Inking

Von der Fa. Trienekens AG wurde ein Verfahren zur Trockensortierung von Deinkingware entwickelt. Dieses Verfahren wurde unter dem Namen „Trie-Inking“ in einer vollautomatischen Pilotanlage in Köln-Merkenich im Jahr 2001 in eine industrielle Anlage überführt.

Der Vorteil des Verfahrens ist die hohe Ausbeute an Deinkingware von bis zu 96 % aus der gemischten Altpapierfraktion. Mit einem Materialdurchsatz von bis zu zwölf Tonnen pro Stunde kann die Anlage im Jahr 65.000 t Altpapier aufbereiten. Der Anteil an papierfremden Stoffen in der erzeugten Altpapiersorte Deinkingware (1.11) liegt bei unter 2,5 %. (32)

Das Verfahren wurde national und international patentiert (33), (34), (35). Die spezifischen Kosten je Tonne Altpapier können mit 38 bis 40 €/t abgeschätzt werden (36).



Abb. 29 Aufbereitungsanlage „Trie-Inking“ für die Herstellung von Deinking-Ware, Fa. Trienekens AG (37)

Die Anlage (Abb. 29) zur trockenen Papieraufbereitung ist in drei Stufen unterteilt [].

Die erste Stufe der Anlage umfasst:

- Sieb/Ballistikseparator zur Abtrennung großer Metalle,
- Zerkleinerer/Granulator zur Zerkleinerung des Stoffstroms in 1 bis 5 cm kleiner Teile,
- Sieb/Manuelle Klaubung zur Entfernung von unerwünschten Stoffen, insbesondere Kunststoffe,
- Zyklon/Windsichter zur Trennung nach spezifischem Gewicht mit den Fraktionen:
 - (1) Schwergut: Glas Metalle, Sand, Kartonagen, Heftklammern, Kleberücken
 - (2) Leichtgut: Tageszeitungen, Illustrierte, Kunststoffe und Feinteile.

Als Gutstoff der ersten Stufe fällt Deinkingware an.

In der zweiten Stufe erfolgt eine weitere Aufbereitung des Schwergutes aus der ersten Stufe. Zur Entfernung weiterer Metallteile wird ein Überbandmagnet eingesetzt. Eine Paddelschnecke dient zur Vereinzelung von zusammen gequetschtem Material. Als Gutstoff der zweiten Stufe fällt Deinkingware (1.11) an.

In der dritten Stufe erfolgt eine weitere Abtrennung von papierfremden Stoffen. Das hier anfallende Fasermaterial wird als Altpapiersorte 1.02 bzw. 1.04 vertrieben.

Der Betrieb der Trie-Inking Anlage erfordert eine starke Zerkleinerung des Papiers im trockenen Zustand. Damit ist ein erhöhter Energieaufwand verbunden sowie eine Verringerung der mittleren Faserlänge des Altpapiers zu vermuten. Ein weiterer Nachteil des Verfahrens ist in der erheblichen Staubentwicklung und der damit verbundenen Brandgefahr zu sehen.

5 Bewertung von Prozessen und Verfahren in anderen Industriebranchen

Die Technologien und Verfahren anderer Industriebranchen wurden hinsichtlich der gewünschten Wirkmechanismen für die Prozesse Faserstoffmahlung, Zerkleinerung, und Druckfarbenentfernung recherchiert. Dabei wurde die Übertragbarkeit auf die Papiererzeugungsprozesse geprüft und bewertet.

5.1 Wesentliche Wirkmechanismen bei den Prozessen und Verfahren der Papierherstellung

Die folgende Tabelle zeigt eine Zuordnung der Prozesse und Verfahren der Papierherstellung, wie sie aus Sicht des Autors den wesentlichen Wirkmechanismen zugeordnet werden können.

Tab. 8 Wirkmechanismen bei der Papierherstellung

Verfahren	Prozess	Wesentliche Wirkmechanismen				
		WM1	WM2	WM3	WM4	WM5
		Zerkleinerung und Zerkleinerung durch Überwindung von Bindungskräften	Ablösung von Verunreinigungen durch Überwindung von Adhäsionskräften	Trennung von Feststoffen und Stoffkomponenten	Trennung der Feststoffe und Stoffkomponenten vom Wasser	Veränderung der Teilchenoberfläche
Zerkleinerung	Zerkleinerung	X	X	X		
Hydro-zyklonierung	Schwerschmutzreinigung			X	X	
	Cleaner			X	X	
Klassierung (Trennung nach Teilchengröße und -form)	Lochsartierung			X	X	
	Schlitzsortierung			X	X	
	Fraktionierung			X	X	
	Wäsche			X	X	
Filtration	Entwässerung				X	
Flotation	Deinkingflotation		X	X		
	Mikroflotation		X	X		
Dispergierung	Disperger	X	X			
Mahlung	Refiner	X				X
Bleiche	Bleiche					X

5.2 Prozesse und Verfahren in anderen Industriebranchen mit den wesentlichen Wirkmechanismen der Papierherstellung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die in Tab. 9 aufgeführten Industriebranchen berücksichtigt. Auf ausgewählte Industriebranchen wird im Folgenden näher eingegangen.

Tab. 9 Recherchierte Industriebranchen

Industriebranchen	Quellen
-------------------	---------

Industriebranchen		Quellen
Mineralstoffe	Eigenschaftsrohstoffe	(38), (39), (40), (41), (42), (43), (44),
	Energierohstoffe	(39), (45), (46), (47), (48)
	Elementrohstoffe	(39)
Leder- und Textilindustrie	Textilproduktion	(49)
	Färbereien	(50), (51)
	Gerbereien	(52)
	Textilreinigung	(53), (54), (55), (56)
Nahrungsmittel-industrie	Fleischverarbeitung	(57)
	Fischverarbeitung	(57)
	Obst und Gemüse	(57)
	Molkerei	(57)
	Pflanzliche Öle und Fette	(57)
Chemie	Allgemein	(58)
Abfall- und Altlastenbehandlung	Kunststoffaufbereitung	(59), (60), (61)
	Altfahrzeug-Recycling	(62), (63)
	Bodensanierung	(64), (65), (66)
Wasser-behandlung	Trinkwasser	(67)
	Brauchwasserbehandlung	(68)
	Abwasserreinigung	(69), (70)
Holzwerkstoffe	MDF-Platten	(71), (72)
Sonstige	Archäologie	(73), (74)

5.2.1 Zerkleinerung und Zerkleinerung durch Überwindung von Bindungskräften

Eine Zerkleinerung bzw. Zerkleinerung durch Trennen von Verbindungen erfolgt bei der Papierherstellung vor allem bei der Stoffauflösung, der Dispergierung und der Mahlung. Bei der Zerkleinerung und Dispergierung werden in erster Linie Adhäsionskräfte zwischen den Papierbestandteilen getrennt. Bei der Mahlung hingegen werden Fasern gekürzt..

In vielen Industriebranchen werden unterschiedlichste **Zerkleinerungsverfahren** und -maschinen eingesetzt. Diese unterscheiden sich nach dem Korngrößenbereich, der Härte und dem Bruchverhalten des Aufgabegutes.

Für die Vorzerkleinerung, z.B. in der Mineralienaufbereitung, werden drückend wirkende Backen- und Kegelbrecher (Schwerkraft bewirkt den Transport durch den Brechraum) und schlagend wirkende Prallbrecher eingesetzt. Abschließend finden vor allem Backen-, Kegel-, Prall-, Walzen- oder Hammerbrecher Verwendung.

Bei der weiteren Zerkleinerung bis in den Feinkornbereich verwendet man Mühlen. Dabei wird zwischen Trocken- und Nassmahlung unterschieden.

Bei der Trockenvermahlung von Mineralien können durch den hohen Druck Agglomerate gebildet werden, die je nach Aufgabengut und gewählten Druck unterschiedliche Festigkeiten aufweisen. In Wasser zerfallen diese Agglomerate in der Regel.

Bei trockenen Verfahrensschritten müssen Maßnahmen getroffen werden, um die Agglomerate zu zerkleinern, so dass das erzeugte Fein- und Feinstkorn für den Flotationsprozess freigelegt wird.

Eine Trockenmahlung erfolgt unter hohen Drücken z.B. in Glattwalzenmühlen, Hochdruck-Gutbett-Mühlen, Hochdruck-Gutbett-Walzenmühlen (Hochdruckzerkleinerung) oder in Wälzmühlen. Dazu wurden in der Vergangenheit Kollergang, heute Ringwalzenmühlen, Fliehkraft-Pendelmühlen und Walzenkugelmühlen eingesetzt.

Eine Nassmahlung erfordert in der Regel für die gleiche Mahlgutmenge einen geringeren Energieaufwand, da mit der höheren Zähigkeit der Flüssigkeit gegenüber der Luft als Trägermedium günstigere Verhältnisse der Kraftübertragung auf das zu mahlende Teilchen geschaffen werden (75).

Bei der Nassmahlung werden in der Regel Mahlkörper (z.B. Nasstrommelmühlen, Nassschwingsiebmühlen) Stahlkugeln oder Cylpebs (= zylinderförmige Körper) verwendet (z.B. Siebkugelmühlen, Autogenmühlen, Schwingmühlen).

Modifizierende Maßnahmen zur Partikelvergrößerung haben auch im Bereich der **Bodensanierung** große Bedeutung. Für ungelöste, feindisperse Partikel kommen Maßnahmen wie Flockung (Agglomerationsflotation) oder die gezielte Anlagerung an groben Partikeln (Trägerflotation) in Frage. Für Stoffe in gelöster Form stehen Fällung und Flockung sowie Adsorption zur Verfügung. Bei der Feinstkornsortierung von Mineralien stellen die Agglomerationsflotation und die Trägerflotation besondere Varianten der Flotation dar, die nur in geringem Umfang industriell genutzt werden.

Zur Herstellung von **MDF-Platten** werden Rundholz, Hackschnitzel, Altholz und Sägespäne eingesetzt. Nach der Entrindung wird das Holz zu Hackschnitzel aufbereitet, die unter Druck und Hitze in einem Refiner zu Fasern aufgeschlossen werden. Zur Hydrophobierung der MDF-Platten wird Paraffin in die Blowline vor dem Refiner zugegeben. Der zerfaserte Stoff wird aus dem Refiner durch die Blasleitung in den Trockner ausgeblasen. Dabei bildet Dampf das Transportmittel für die Fasern auf ihrem Weg durch die Blasleitung. Dann erfolgt die Beleimung und Trocknung der Fasern auf 5 – 10 % Restfeuchte. In der Formbandanlage werden die beleimten Fasern in einer Schicht ausgestreut, vorverdichtet und gepresst.

5.2.1.1 Wirkprinzipien aus der Sicht der Verfahrenstechnik

Die Spannungsverteilung in einem Partikel hängt von verschiedenen Faktoren ab. Das Verformungsverhalten des Feststoffs, die Partikelform und die Beanspruchungsart spielen eine Rolle. Abb. 30 gibt einen Überblick über die verschiedenen Beanspruchungsarten auf denen Zerteilprozesse basieren.

Es wird unterteilt zwischen vier verschiedenen Beanspruchungsarten:

- I. Beanspruchung zwischen zwei Flächen / Werkzeugen
- II. Beanspruchung zwischen einer Fläche / Werkzeug
- III. Beanspruchung durch das umgebende Medium / Scherströmungen und Turbulenzfeldern
- IV. Beanspruchung infolge nichtmechanischer Energiezufuhr / z.B. Druckwellen

Die beschriebenen Beanspruchungsarten sollen die Einwirkungen der Maschine charakterisieren und lassen nicht unbedingt auf den Spannungszustand in den Partikeln schließen.

Es entsteht ein dreidimensionaler Spannungszustand mit Zug-, Druck-, und Schubspannungen, welcher sich nur in Sonderfällen berechnen und vorhersagen lässt. Das Finden einer günstigen Beanspruchungsart für ein Mahlgut hängt von vielen verschiedenen Faktoren wie dem Verformungs-, und Bruchverhalten sowie Form und Größe der jeweiligen Partikel ab.

In den verschiedenen Zerkleinerungsmaschinen kommen die genannten Beanspruchungsarten nie alleine beziehungsweise eindeutig vor, sondern immer zu gewissem Grade parallel. (42)

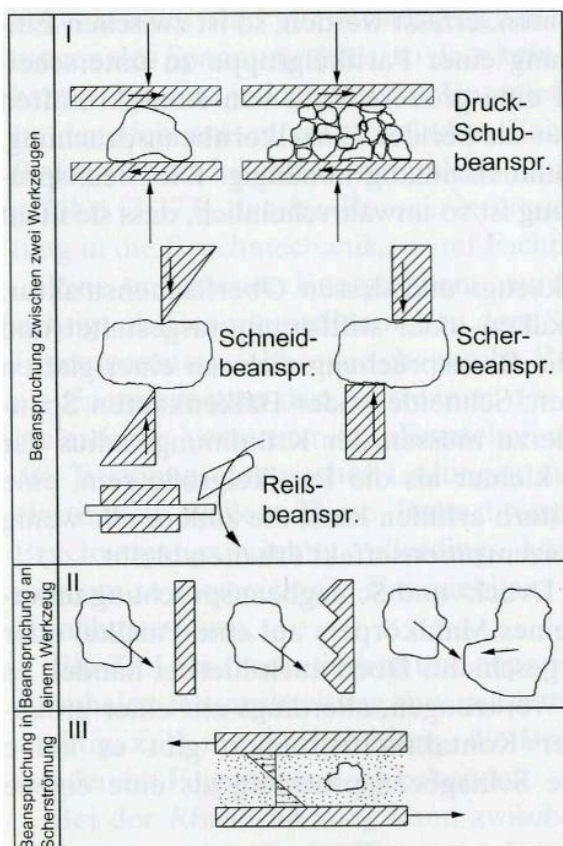


Abb. 30 Partikelbeanspruchung (76)

5.3 Zerkleinerung in der Abfallwirtschaft

In der Abfallwirtschaft spielt das Zerkleinern eine zentrale Rolle bei der Verwertung und Entsorgung von Abfällen unterschiedlichster Herkunft.

Das technologische Ziel besteht im Allgemeinen aus (76):

- Erreichen von bestimmten Stoff- und Partikelgrößenverteilungen, die bei der Weiterverwertung von Vorteil sind
- Erhöhung der Schüttgutedichte zur Reduzierung des Deponievolumens

- Verbesserung der Förderbarkeit und des Stoffumwandlungsverhaltens (beispielsweise Verbrennungsverhalten), die aus der Notwendigkeit resultieren bestimmte Produkte wie Akten, EDV-Papiere oder Injektionsspritzen zu zerstören
- Aufschließen der Bestandteile von Verbundwerkstoffen wie Textilien, Holz, Pappe und Papier in Faserverbunde beziehungsweise einzelne Fasern
- Vorbereitung auf anschließende Sortierprozesse zur Weiterverarbeitung und Aufbereitung

Tabelle 10 gibt einen Überblick über die in der Abfallindustrie eingesetzten Zerkleinerer. Es wird unterschieden zwischen harten, duktilen, weichen bis zähelastischen Rohstoffen. Diese wiederum werden in verschiedene Zerkleinerungsklassen von bis 150 mm, über bis 50 mm hin zu maximal 10 mm eingeteilt.

Unterstrichen sind diejenigen Zerkleinerer auf welche in Laufe dieser Bachelorarbeit genauer eingegangen wird.

Tab. 10 Übersicht über die in der Abfallwirtschaft eingesetzten Zerkleinerer (76)

Rohstoff/ Materialeigenschaft Zielkorngröße	Grobzerkleinerung ca. < 150 mm	Mittelzerkleinerung ca. < 50 mm	Feinzerkleinerung ca. < 10 mm
Mineralien, Bau-schutt <i>hart bis mittelhart</i>	Backenbrecher Prallbrecher Schlagwalzenbrecher	Schlagbrecher Prallbrecher	<u>Stab-/Kugelmühle</u> <u>Feinprallmühle</u> <u>Stiftmühle</u> Schlagkreuzmühle
Metalle/Schrotte, Altkabel <i>duktil</i>	Schrottschere Schredder Hammerbrecher Rotorschere	Schredder Hammermühle Einwellenzerkleinerer <u>Schneidmühle</u>	Spänebrecher <u>Schneidmühle</u>
Haus- und Sperrmüll, Gewerbeabfall <i>weich, mittelhart, elastisch bis zähelastisch</i>	Rotorschere Kammwalzenzerkleinerer Schraubenmühle Autogenmühle	Rotorschere Kammwalzenzerkleinerer Hammermühle Einwellenzerkleinerer	Einwellenzerkleinerer Hammermühle
Thermoplaste, Elastomere <i>zähelastisch</i>	Rotorschere	Einwellenzerkleinerer <u>Schneidmühle</u> Hammermühle (kryogen)	<u>Schneidmühle</u> Hammermühle (kryogen)

5.3.1.1 Alternative Bauarten von Mahlmaschinen

5.4 Zerkleinerungsmühlen

In den folgenden Abschnitten wird auf verschiedene Zerkleinerungsmühlen aus unterschiedlichen Industriezweigen eingegangen. Auswahlkriterium für die Mühlen war eine sinnvolle beziehungsweise ähnliche Partikelbeanspruchung wie sie auch bei der konventionellen Mahlung in der Papierindustrie vorkommt.

5.4.1 Mahlkörpermühlen

Zu den Mahlkörpermühlen gehören Autogen-, Stab-, Planeten-, Schwing-, Zentrifugal- und Rührwerkmühlen, womit sie die umfangreichste Gruppe der Zerkleinerungsmaschinen bilden.

In allen Mahlkörpermühlen werden die eingesetzten Mahlkörper und das Mahlgut kontinuierlich im Prozessraum umgewälzt. Dadurch ergeben sich Stöße zwischen den Mahlkörpern, sowie zwischen Mahlkörpern und Wänden. Durch diese Stöße werden die zu zerkleinernden Partikel durch Druck, Schlag, Schub und Scherung beansprucht beziehungsweise zerkleinert. Mahlkörpermühlen zeichnen sich durch ihr stabiles Betriebsverhalten sowie ihre geringe Störanfälligkeit aus.

Eingesetzte Mahlkörper können unterschiedlicher Form und Materials sein. Sie bestehen aber meistens aus Stahl und haben eine Kugel-, oder Zylinderform.

Es gibt drei Möglichkeiten des Energieeintrages. Durch Drehen, durch eine Schwingbewegung des Mahlrohrs oder durch ein Rührwerk innerhalb der Mühlen.

Mahlkörpermühlen können sowohl für die Trocken- als auch für die Nassmahlung eingesetzt werden. (42), (77)

5.4.2 Kugelmühlen

Kugelmühlen werden eingesetzt, um mittelharte bis sehr harte, spröde und faserige Materialien zu zerkleinern. Es kann sowohl trocken- als auch nass gemahlen werden. Kugelmühlen sind meist aus einem horizontal gelagerten kreiszylindrischen Rohr gefertigt, das mit einer auf der inneren Seite angebrachten Panzerung versehen ist. Durch die Mühlenpanzerungen wird das Mühlenrohr geschützt und gleichzeitig die Mitnahme der Mühlenfüllung verbessert. Bei Trockenmühlen bestehen die Mühlenpanzerungen meist aus Stahl, bei Nassmühlen meist Gummi.

Kugeln oder Cylpebs (zylindrisch) aus Stahl (teilweise Keramik, Gusseisen, Stein, Porzellan oder Stein) werden als Mahlkörper eingesetzt. Diese haben sich als besonders abriebfest und kostengünstig erwiesen. Der Mahlraum ist häufig durch Zwischenwände getrennt, was es erlaubt, in den unterschiedlichen Kammern unterschiedliche Mahlkörper einzusetzen. Die Mahlkörper werden häufig zur Austragskammer hin kleiner.

Kugelmühlen werden durch eine Öffnung in einer der Stirnwände mit dem zu mahlenden Gut gefüllt. Je nach Bauform wird der Austrag unterschiedlich abgeführt. Bei großen Trockenmühlen wird das gemahlene Gut meist über den Lagerhohlzapfen in die Austragskammer abgeführt. Mittlere und kleine Trockenmühlen werden häufig durch Schlitze in der Rohrwand am Kegelmühlenende „entleert“ (peripherer Endaustrag).

Der Antrieb von Kegelmühlen erfolgt über einen Zahnkranz am kreiszylindrischen Rohr (bis ca. 7 MW), oder zentral an einem Halslagerzapfen (1 bis 14 MW). (42)

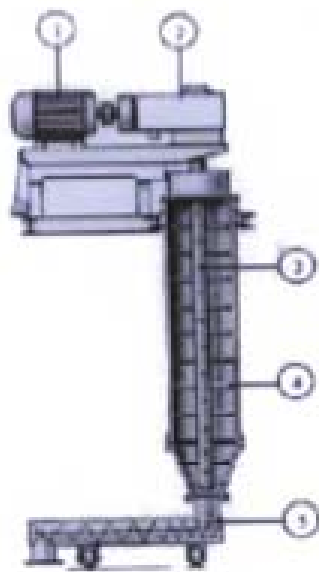
5.4.3 Rührwerkskugelmühlen

Rührwerkskugelmühlen, auch Rührwerkmühlen genannt, können vertikal oder horizontal ausgerichtet sein. Abb. 31 zeigt eine vertikal ausgerichtete Rührwerkskugelmühle, die für den kontinuierlichen und trockenen Mahlbetrieb von Weizen ausgelegt

ist. Das Mahlgefäß wird gleichmäßig von Mahlgut und Mahlperlen durchströmt, wodurch es zu einer Druck, Schlag, Schub und Scherung des Mahlgutes zwischen den Mahlperlen kommt.

Diese Beanspruchungsart (Kombination aus Druck und Schub) wird als Attritionsmahlung bezeichnet. Da bei der Attritionsmahlung ca. 95% der eingebrachten Energie in Wärme umgesetzt werden, ist eine Überwachung beziehungsweise Kühlung der Mühle bei kontinuierlichem Gebrauch notwendig.

Bei der abgebildeten Mühle (Abb. 31) haben die Mahlperlen einen Durchmesser von 1-7mm, was sich bei der Mahlung von Weizen als technologisch sinnvoll ergeben hat.



es bedeuten:
1. regelbarer Antrieb
2. Winkelgetriebe,
3. Rührwelle,
4. Rührelemente
5. Austragsschnecke.
(42), (79)

Abb. 31 Rührwerkskugelmühle ATR (Quelle: (78))

5.4.4 Prallmühlen

Prallmühlen umfassen Apparate der Feinzerkleinerung, bei denen Partikel durch einen Aufprall an einer Fläche beansprucht werden. Die im Rahmen dieser Bachelorarbeit verwendete Fritsch Pulverisette 15 und die Retsch-Ultrazentrifugalmühle ZM 200, basieren auf diesem Mahlprinzip. Sie werden in verschiedenen Industriezweigen für das Mahlen von mittelharten bis weichen sowie viskoelastischen Stoffen eingesetzt.

Wie in Abb. 32 zu sehen, stoßen die Partikel entweder an unterschiedlich geformte Werkzeuge, oder an einem anderen Partikel.

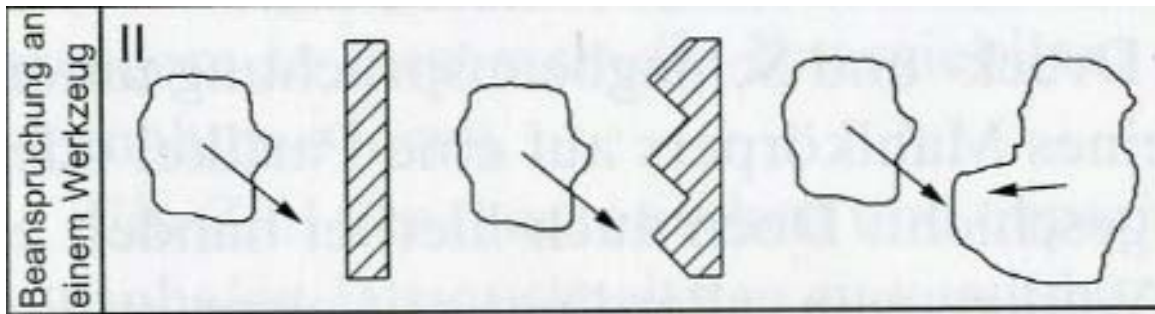


Abb. 32 Beanspruchung an einem Werkzeug (42)

Die Beanspruchungsintensität wird durch die kinetischen Energien von Partikel und Stoßpartner bestimmt, wodurch es eine Abhängigkeit zwischen Beanspruchungsintensität und Beanspruchungsgeschwindigkeit gibt.

Bei Prallmühlen wird zwischen Rotor- und Strahlprallmühlen unterschieden. Rotorprallmühlen bringen die Energie durch einen schnell laufenden Rotor ein. Strahlprallmühlen durch mehrere Gas- beziehungsweise Dampfstrahlen. Im Gegensatz zu den Strahlprallmühlen kommt es bei den Rotorprallmühlen überwiegend zu Partikel – Werkzeug Stößen und zu deutlich weniger Partikel – Partikel Stößen.

Je nach Ausführung der Prallmühlen werden Rotorumlaufgeschwindigkeiten von 20 m/s bis 200 m/s beziehungsweise Dampfstrahlgeschwindigkeiten über Schallgeschwindigkeit erreicht. (42)

5.4.5 Rotorprallmühlen

Rotorprallmühlen finden ihren Einsatz bei der Mahlung von mineralischen, pflanzlichen und tierischen Stoffen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie sowie bei der Abfallverwertung.

Rotorprallmühlen sind für die Mahlung besonders harter Stoffe nicht geeignet, da sich ein zu hoher Verschleiß ergäbe. Die Feinheit des Mahlgutes ergibt sich durch die interne Sieb- oder Stromklassierung. Aufgrund großer Unterschiede im Verformungs- und Bruchverhalten sowie Feucht- und Hafteigenschaften des Mahlgutes sind viele unterschiedliche Bauformen von Prallmühlen entwickelt worden. (80), (81)

Bauformen

Es gibt über 50 verschiedene Varianten von theoretisch sinnvollen Rotorprallmühlen, wovon sich aber weit weniger in der Praxis durchgesetzt haben. Die Abb. 33 bis Abb. 36 geben einen Überblick über die am häufigsten eingesetzten Rotorprallmühlen. (42)

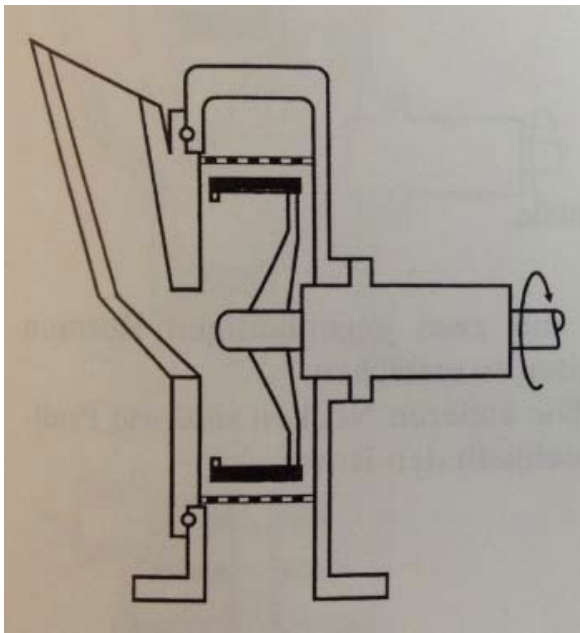


Abb. 33 Mühle mit Prallplattenrotor und Siebklassierung (42)

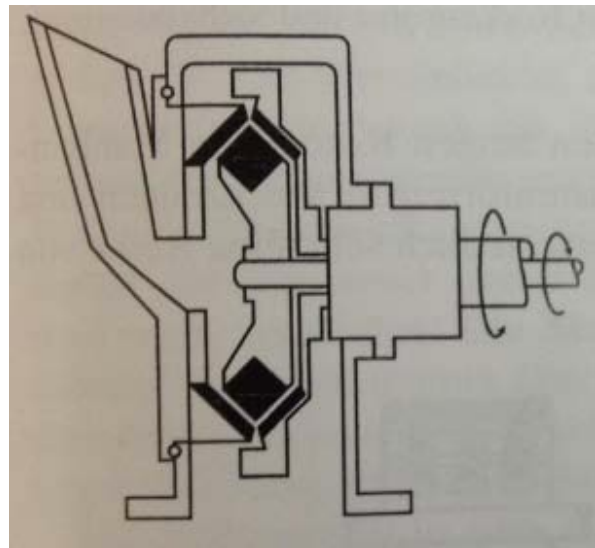


Abb. 34 Mühle mit Prallplattenrotor und Klassierschlitz sowie rotierender Mahlbahn (42)

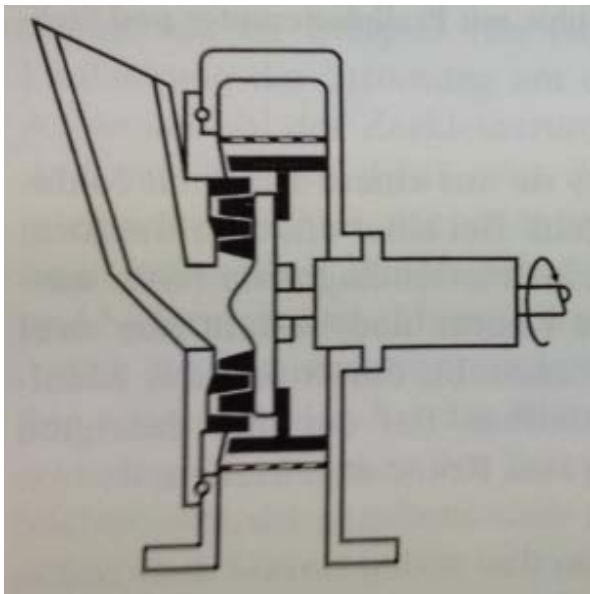


Abb. 35 Mühle mit Nockenrotor und Siebklassierung (42)

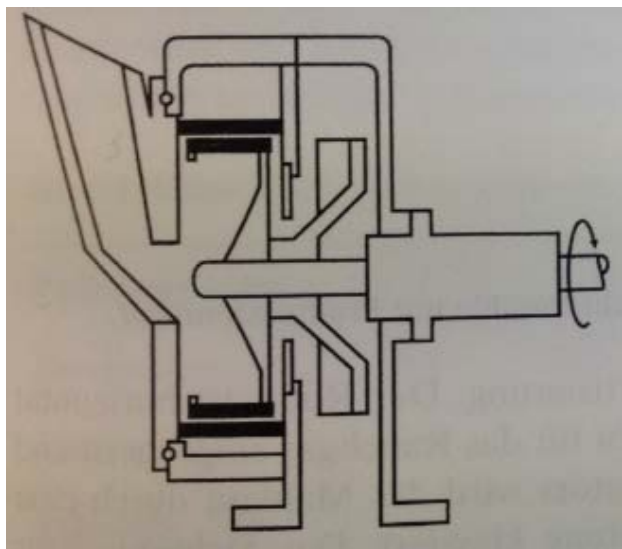


Abb. 36 Mühle mit Prallplattenrotor und Stromklassierung (42)

5.4.6 Stab-/Stiftmühle

Stabmühlen, wie sie in Abb. 37 zu sehen sind, finden ihren Einsatz bei der Zerkleinerung unterschiedlichster Produkte aus den Bereichen Mineralien-, Chemie-, Kunststoff- und Lebensmittelindustrie. Sie lassen sich sowohl nass als auch trocken betreiben und erzeugen Mahlprodukte zwischen einem und mehreren Millimetern Größe. Die zu mahlenden Teilchen werden durch Prall und Reibung beansprucht. „Die mit hoher Geschwindigkeit rotierenden Zerkleinerungsorgane treffen dabei auf die relativ langsam bewegten Teilchen des Vermahlungsgutes, beschleunigen diese stark und lassen sie so gegen andere Teilchen oder Prallplatten (Stifte) prallen“ (42), (79) Rumpf weist nach, dass von der Verformungsenergie nur ein Teil zum Zerkleinern benötigt wird, und zwar zur Erzielung des Sprödbrechens. Der andere Teil dient zur plastischen und elastischen Verformung des Teilchens. Als spezifisches Merkmal der Prallzerkleinerung, Körper im freien Flug zu prallen und aus dem freien Flug aufprallen zu lassen, wird der Zweierstoß angesehen“ (79), (80), (81)

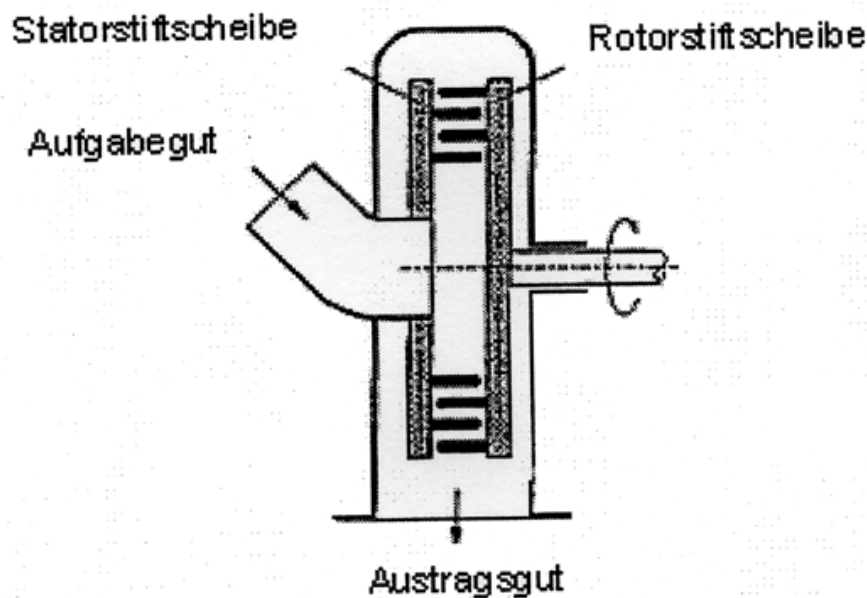


Abb. 37 Wirkprinzip der Stabmühle (79)

5.4.7 Ablösung von Verunreinigungen durch Überwindung von Adhäsionskräften

Eine Ablösung von Verunreinigungen (faserfremde Bestandteile, Druckfarbepartikel, Stickies u.a.) erfolgt in der Papierindustrie vor allem bei der Zerfaserung, der Deinkingflotation und im Disperger. Der weitere Transport und Austrag dieser Verunreinigungen erfolgt mit unterschiedlichen Verfahren (z.B. Sortierer, Cleaner, Flotation u.a.).

Klassische Ablösevorgänge, wie sie dem Ablösen von Verunreinigungen und Druckfarbepartikeln von der Papierfaser entsprechen, finden sich auch im Bereich der **Bodensanierung**. Hier werden beim Verfahrensschritt Nassaufschluss Schadstoffe von Bodenpartikeln gelöst.

Auch bei der **Mineralienaufbereitung** werden durch den Zerkleinerungsprozess die Mineralien von der Gangart (begleitende Mineralien) abgetrennt bzw. abgelöst. Weit- aus besser lässt sich der Ablösevorgang in der Mineralienaufbereitung auf Gesteine übertragen, die im trockenen oder wenig feuchten Zustand eine feste geschlossene Struktur einnehmen, aber bei Zugabe von Wasser und mäßigen Energieeintrag in meist sehr feinkörnige mineralische Bestandteile zerfallen. Beispiele hierfür sind Tone, Lehm und Kreide. Das Dispergieren und Abtrennen der zerreibbaren Substanzen nennt man Läu- tern. Apparativ werden hierzu Schwererwäscher und Läu- tertrommeln eingesetzt. Ähnliche Apparate finden sich auch in der **Bodensanierung** wieder. Grundsätzlich ist für die Aufhebung der Bindungskräfte zwischen Schadstoff und Boden- korn bzw. zwischen Mineral und Bodenkorn der Eintrag mechanischer Energie erforderlich.

Im Bereich der industriellen Abwasserreinigung ist der Vorgang des Ablösens nicht zu finden. Hingegen werden Methoden wie die Anlagerung an speziellen Adsorpti- onsmitteln zur Vergrößerung der abzutrennenden Partikel eingesetzt.

5.4.8 Trennung von Feststoffen und Stoffkomponenten

Sortieren und Klassieren

Für die Papierindustrie dienen unterschiedliche Klassier- und Sortierprozesse zur Ab- trennung von Verunreinigungen von den gewünschten Stoffkomponenten Fasern und Füllstoffe. In einer Fraktionierung werden gezielt unterschiedliche Stofffraktionen er- zeigt.

Zahlreiche Industriebranchen nutzen diese Verfahren zur Trennung ihrer Rohstoffe. Im Bereich der Mineralienaufbereitung und Bodensanierung werden über das Klas- sieren und Sortieren gezielt Fraktionen erzeugt, die Gutstoff, Reststoff oder weiter aufzubereitendes Produkt darstellen können.

Flotation

Bei der Papierherstellung dient die Flotation vor allem dazu, die durch die Deinking- chemikalien bereits weitestgehend abgelösten Druckfarbenpartikel zu agglomerieren, von den Faserstoffen zu trennen und auszutragen. In zahlreichen Industriebranchen und Anwendungen wird ebenfalls das Flotationsverfahren zur Stofftrennung und zur Abtrennung von Verunreinigungen eingesetzt.

Damit eine Flotation zur Stofftrennung so effektiv wie möglich betrieben werden kann, muss der Stoff vor bzw. in dieser Prozessstufe entsprechend konditioniert wer- den. Von großer Bedeutung im Bereich der Mineralienaufbereitung ist der Einsatz von Flotationsreagenzien. Um die Flotation gezielt zu beeinflussen, werden Sammler, Regler und Schäumer eingesetzt. Sammler sind selektiv wirkende, hydrophobierende Reagenzien. Regler beeinflussen die Adsorption des Sammlers, als Drücker zur Ver- hinderung der Adsorption bzw. als Beleber für eine spätere Aktivierung der Adsorpti- on, eine wesentliche Rolle spielt hierbei der pH-Wert. Schäumer sind grenzflächen- aktive Reagenzien, die zur Erzielung einer geeigneten Schaumschicht verwendet werden. Zur Erzielung des Trennerfolges beim Deinken werden hydrophobierende und schaumstabilisierende Reagenzien zugefügt.

Beim Bodenwaschen ist der Einsatz von Hilfsmitteln zur gezielten Beeinflussung der Hydrophobie nicht üblich, da man von natürlichen Hydrophobieunterschieden (z.B. Öl, Teerteilchen) ausgeht (82).

Im Bereich der Abwasseraufbereitung werden je nach Anwendungsfall Chemikalien zur Fällung und/oder Flockung eingesetzt.

Mineralstoffindustrie - Steinkohleaufbereitung

Zunächst wird die geförderte Rohkohle gesiebt. Der Siebüberlauf wird von groben Verunreinigungen über die Vorklassierung gereinigt und in Brechern auf unter 150 mm zerkleinert. Um die Einhaltung einer gleichmäßigen Qualität des Fertigproduktes zu garantieren, gelangt das Material in einen Vergleichsmäßigkeitsbunker. Nach der Homogenisierung erfolgt die Trockenklassierung, bei der im Allgemeinen Siebmaschinen (mit Lochblenden oder Draht-, Kunststoff-, Gummigeweben) eingesetzt werden.

Die Grobkornfraktion (> 10 mm) wird bei der nachfolgenden Aufbereitung in Grobkohle, Grobmittelgut und Grobberge aufgetrennt. Aus der Rohfeinkohle mit einem Korndurchmesser unter 10 mm wird durch Windsichtung der Staub entfernt und anschließend in nass arbeitenden Verfahren in Feinkohle, Feinmittelgut und Feinberge aufgeteilt. Die Auftrennung der Rohkohle erfolgt nahezu ausschließlich mit nassmechanischen Verfahren, die eine Sortierung aufgrund von Dichteunterschieden (z.B. im Aufstromverfahren – Schwimmgut ist die Kohle, Sinkgut sind die Abgänge, Setzmaschinen, Schwertrübescheider, Rinnen, Schüttelherde) oder verschiedenen Oberflächeneigenschaften (z.B. Flotation) ermöglichen.

5.4.9 Trennung der Feststoffe und Stoffkomponenten vom Wasser

Bei der Papierherstellung werden die Feststoffe und Stoffkomponenten in der Regel durch Siebe und Pressen vom Wasser abgetrennt. In anderen Industriebranchen werden vergleichbare Techniken zur Trennung der Feststoffe vom Wasser eingesetzt.

In der Abwasserreinigung dient die Flotation dabei ebenfalls dem Abtrennen der festen von der flüssigen Phase und ist dementsprechend kein Sortierverfahren. Die (unselektive) Flotation in der Wasseraufbereitung kann vielmehr als „umgekehrte Sedimentation“ angesehen werden (83). In der industriellen Abwasserreinigung können Fällungs- und Flockungsprozesse zur Konditionierung der abzutrennenden Stoffkomponente vorgeschaltet werden. Bei der nicht-selektiven Partikelabtrennung aus Abwässern kompensiert man die geringe Hydrophobie durch Anwendung sehr kleiner Blasen. Aus diesem Grund wird apparativ im Bereich der Abwasserbehandlung vorwiegend die Entspannungsflotation (Mikroflotation) eingesetzt.

5.5 Zusammenfassung

Die Papierindustrie nutzt wie viele Branchen wasserdisperse Systeme, um die notwendigen Faserstoffe aufzubereiten und von Verunreinigungen zu trennen. Dabei entstehen durch die Verdünnungs- und Entwässerungsvorgänge erhebliche Energieverluste, da durch die dazu notwendigen Transport- und Übertragungsvorgänge

enorme Energiemengen verbraucht werden. Das bei der Papiererzeugung entstehende Fasernetzwerk wird durch Adhäsionskräfte zusammengehalten.

Die Ergebnisse der bewerteten Industriebranchen hinsichtlich einer eventuellen Überführung von Verfahren in die Papierindustrie sind zusammenfassend in Tab. 11 dargestellt. Dabei konnten nur zwei Verfahren gefunden werden, die ein Potenzial für eine Überführung in den Papierherstellungsprozess aufweisen.

Tab. 11 Prozessen und Verfahren in anderen Industriebranchen

Industrie-bereich	Verfahren	Beschreibung / Bewertung
Bodensa-nierung	Fällung, Flockung, Agglomerations-flotation, Trägerflotation, Adsorption	Sehr ähnlich zu bestehenden Verfah-ren, → Ansatz nicht zielführend
Holzwerk-stoffe (MDF Platten)	Kocher mit Refiner, Faserverbund trocken erzeugt durch Binder statt Wasserstoffbrücken	Vollständig andere Faser-/ Faserbin-dung, → Potenzial vorhanden
Mineraliena ufbereitung	Trockenmahlung durch Ringwal-zenmühlen, Fliehkraft-Pendelmühlen oder Walzenkugel-mühlen	Trockenmahlung ist wegen der gerin-geren Viskosität von Luft tendenziell energieintensiver als Nassmahlung, → Ansatz nicht zielführend
Mineraliena ufbereitung	Nassmahlung durch Nasstrommel-, Nassschwingsieb-, Siebkugel-, Au-togen-, Schwingmühlen	Ähnlichkeit zu Kompressionsmahlung, → Ansatz nicht zielführend
Textilin-dustrie	Abtrennung von Schmutzpartikeln mit Tensiden	Sehr ähnlich zu bestehenden Verfah-ren, → Ansatz nicht zielführend

Bei der MDF-Plattenherstellung erfolgen die notwendigen Aufbereitungs- und Reinigungsschritte im Wesentlichen ohne Wasserzugabe. Die anschließende Erzeugung eines Faser-netzwerkes wird durch die Zugabe von Klebstoffen bewirkt. Wenn es möglich wäre, die Alt-papierstoffaufbereitung auch in solchen „trockenen“ Reinigungsschritten durchzuführen und anschließend das gereinigte Rohmaterial für die Blattbildung mit Wasser zu verdünnen, könnten der heute erforderliche hohe Energieeinsatz für den Transport von großen Wassermengen so stark minimiert werden.

6 Alternative Verfahren

6.1 Zustand und Bewertung des Ausgangsmaterials

Als wesentliche Ansatzpunkte für eine Energieeinsparung im Auflöseprozess sind die Erhöhung der Stoffdichte sowie eine Verbesserung des Energieübergangs vom Aggregat zur Faser zu nennen. Ausgehend von dieser Erkenntnis erfolgte die Auswahl der nachfolgenden Konzepte. Für alle Versuche wurde ein Altpapiergemisch von 50 % Zeitung und 50 % Magazinpapier verwendet. Der Glührückstand bei 575 °C liegt bei 27,7 %.

Der Ablauf der Laboruntersuchung war für jeden Versuch gleich. Je Versuch wurden 32 g_{otro} Faserstoff bereitgestellt. Nach der Zerkleinerung im entsprechenden Aggregat wurde der Faserstoff (3 min bzw. 10000 U) im Desintegrator behandelt und anschließend in einen Verteilgerät überführt, mit Wasser auf 9 l aufgefüllt und normgerecht verteilt. Die Entnahme der benötigten Suspensionsmenge erfolgte bei laufendem Rührwerk. Die Ermittlung der Entwässerungskennwerte erfolgte als Doppelbestimmung.

Für die Bestimmung des Stippengehalts wurden je 16 g_{otro} Faserstoff unbehandelt in ein Verteilgerät überführt, mit Wasser auf 5 l aufgefüllt und normgerecht verteilt. Die aus dem Verteilgerät bestimmten Eigenschaften lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Entwässerungswiderstand (SR-Wert)
- Stippengehalt
- Faserabmessungen mittels Kajaani FiberLab™ (nach Tappi-Standard)

Des Weiteren wurden am Prüfblatt gemessen:

- Grundeigenschaften (Dicke, Flächenbezogene Masse)
- Festigkeitseigenschaften (Tensile-Index, Weitereißarbeit Brecht-Imset)

6.2 Zerkleinerung mittels Doppelschneckenextruder am Technikum Freital-Hainsberg

6.2.1 Aggregat und Arbeitsweise

Aus der Holztechnik sind Doppelschneckenextruder schon hinreichend bekannt; sie dienen dort zum Beispiel zur Herstellung von Halbzeugen aus Holz-Plastik-Compoundmaterialien. Der Rohstoff wird zwischen zwei konisch angeordneten, gegenläufig rotierenden Schnecken durch Zwangsförderung verdichtet, hierbei kommt es immer wieder zur Umlagerung und Scherung des Materials. Durch die innere Reibung sowie die Reibung an der Extruderwand wird das Material zerkleinert.

Der Einsatz von Holz erfolgt dabei in Form von Holzmehl und Holzfasern bis hin zu Pellets. Diese werden während der Extrusion durch die hohe Energiedichte in der Kompressionszone zwischen den beiden Schnecken aufgeschlossen und dann durch eine Extrusionsdüse in die entsprechende Form gepresst.

6.2.2 Versuchsplan und Durchführung

Die Extruderbehandlung am Technikum Hainsberg erfolgte bei Raumtemperatur und bei Umgebungsdruck im Doppelschneckenextruder MSZ-T15/2 der Firma LEHMANN Maschinenbau GmbH mit folgenden technischen Parametern:

- Antriebsleistung: 2 x 7,5 kW
- Gegenläufige Schneckenrotation
- Maße (L x B x H): 2,11 m x 1 m x 1,28 m
- Schneckenabstand: 20 mm

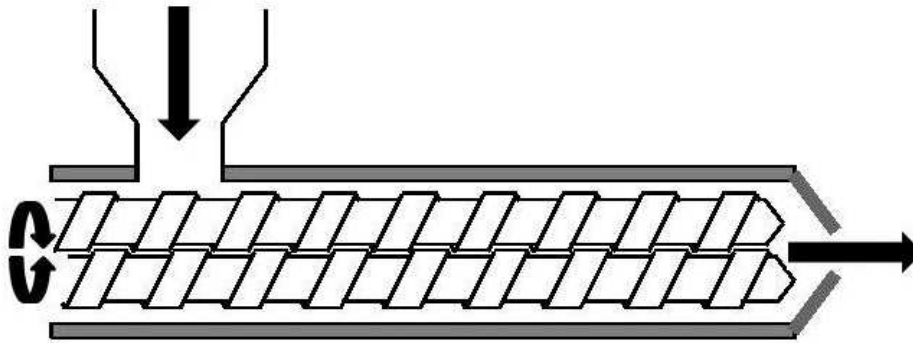


Abb. 38 Schema eines Doppelschneckenextruders

Es wurden je 1 kg Altpapier bei unterschiedlichen Stoffdichten von 20 bis 60 % zerfasernt. Das Altpapier ist dafür auf 10x10 cm große Stücke gerissen und über Nacht vorgequollen worden. Danach erfolgte die Zuführung zum Extruder innerhalb von 1,5 min. Anschließend wurde der Faserstoff zur Ausprüfung 10.000 Umdrehungen desintegriert.

Im Gegensatz zu den in der Industrie eingesetzten Pressschneckenapparaten arbeitet dieser Doppelschneckenextruder drucklos und ohne Temperaturregulierung. Dadurch ist die Reproduzierbarkeit von großtechnischen Abläufen eingeschränkt.

6.2.3 Ergebnisse

Bei gleichbleibendem Energieeinsatz lässt sich im Bereich von 20 bis 50 % Stoffdichte eine Abhängigkeit des Stippengehalts von der Stoffdichte erkennen (Tab. 12). Der Entwässerungswiderstand steigt bis zu einer Stoffdichte von 40 %. Dabei verändern sich die Faserlängenverteilung kaum, sowie die Festigkeitseigenschaften nur entsprechend dem Verlauf des Entwässerungswiderstandes. Demzufolge ist mit steigendem Entwässerungswiderstand unabhängig von der Zerfaserungsstoffdichte die gleiche Faserstoffcharakteristik zu erwarten.

Tab. 12 Ergebnisse Fasermessung Extruderzerfaserung

Stoffdichte	L (n)	L(l)	mittlere Faserbreite	SR-Wert in	Tensile-Index	Weiterreißarbeit BI	Stippengehalt	Spezifischer Energieverbrauch
%	mm	mm	µm	°SR	Nm/g	mNm/m	%	kWh/t
20	0,55	0,91	18,85	28	18,8	610	28,4	109,25
30	0,49	0,91	19,03	33	17,5	639	34,3	109,25
40	0,56	1,08	19,86	37	23,1	889	51,0	109,25

50	0,56	1,06	19,87	36	21,2	843	75,4	109,25
60	0,57	1,02	19,74	33	16,9	671	63,2	109,25

Abb. 39 zeigt die Faserlängenverteilung der Extruderversuche als relative Häufigkeitsverteilung im Vergleich zum konventionell im Desintegrator aufgeschlagenen Ausgangsrohstoff. Auf Grund sehr geringer Faseranteile im Bereich $>1,5$ mm ist der Ergebnisbereich nur bis zu diesem Wert aufgezeigt. Zu erkennen ist, dass keine wesentliche verfahrensbedingte Änderung der Faserlängenverteilung stattfindet. Im Bereich der Faserlänge von 0,2 mm bis 0,7 mm sind bei allen Extruderversuchen 0,5 % bis 1,0 % höhere Anteile zu sehen; die Laborzerfaserung hat jedoch im Bereich der Faserlänge $<0,2$ mm einen deutlich höheren Peak, das deutet auf eine etwas schonendere Zerkleinerung im Extruder im Vergleich zur Labordesintegration hin. Die Erhöhung der Stoffdichte hatte keine von der Norm abweichende Faserkürzung zur Folge, wie es durch eine höhere innere Reibung im Extruder vermutet wurde.

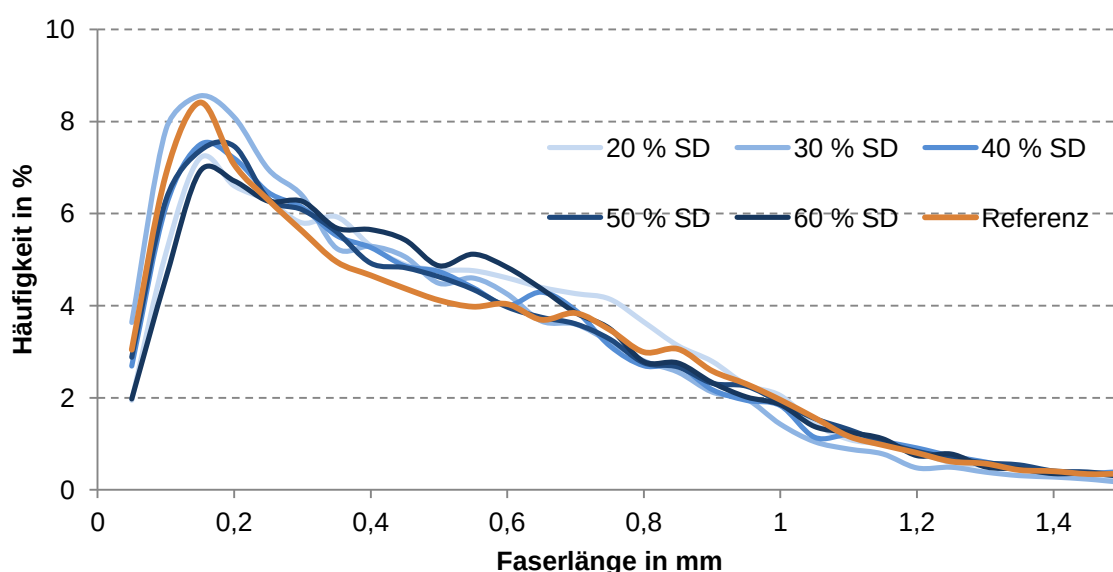


Abb. 39 Relative Faserlängenverteilung Extruderversuche

6.3 Zerkleinerung mittels Hobart-Pulper an der PPT

6.3.1 Aggregat und Arbeitsweise

Das Aggregat findet vorrangig in der Lebensmittelindustrie zum Mischen und Kneten von Teigwaren Verwendung. Wichtigstes Kennzeichen ist der charakteristische, exzentrisch rotierende Rührer. Abb. 40 zeigt den an der PPT vorhandenen Hobart-Pulper. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Verfahren handelt es sich um ein diskontinuierliches Verfahren. Bei hoher Stoffdichte wird das Altpapier durch hohe innere Reibung, hervorgerufen durch den Rührer, sowie der Reibung an der Behälterwand zerkleinert.



Abb. 40 Hobart-Pulper an der PPT

6.3.2 Versuchsplan und Durchführung

Für die Zerkleinerung im Hobart-Pulper liegt eine Arbeitsanweisung der INGEDE vor. Pro Ansatz ist nach der INGEDE-Methode 11 1.333 ml Faserstoff zu verarbeiten. Die erforderliche Stoffdichte wurde durch das Einstellen des Verhältnisses zwischen Wasser und Faserstoff bei gleichbleibender Menge erreicht. Jedoch erfolgte abweichend zur INGEDE-Methode 11 keine Chemikaliendosierung, die auf 15 % festgesetzte Stoffdichte wurde dem Versuchsplan entsprechend variiert.

Das auf 10 x 10 cm vorzerkleinerte Altpapier konnte im Vorversuch bei Intensitätsstufe 4 bei Stoffdichten von 15 bis 35 % in einer Zeit von 20 min gleichermaßen stippenfrei zerkleinert werden. Der spez. Energiebedarf lag bei 15 % SD und bei 35 % SD. In einer weiteren Versuchsreihe wurde bei der höchsten möglichen Stoffdichte von 35 % mit einer Intensität der Stufe 2 gearbeitet und die Zerkleinerungszeit sukzessive verkürzt, um den spez. Energiebedarf zu reduzieren. Der Faserstoff wurde vor der Weiterverarbeitung ebenfalls noch mit 10.000 U desintegriert.

6.3.3 Ergebnisse

Bereits nach 5 Minuten war mit 10,3 % Stippengehalt und einem spez. Energiebedarf von 75,11 kWh/t ein ausreichendes Zerkleinerungsergebnis zu verzeichnen. Wie in Tab. 13 zu sehen, steigt der Stippengehalt mit zunehmender Zeit im Pulper wieder an. Dieses Ergebnis kommt auf Grund von Verspinnungen von Einzelfasern zustande, welche bei hohen Stoffdichten im Hobart-Pulper entstehen. Bei gleichbleibendem Entwässerungswiderstand ändern sich Fasereigenschaften und Festigkeiten nicht.

Tab. 13 Ergebnisse Fasermessung Hobart-Pulper

Zeit in	L (n)	L(l)	mittlere Faserbreite	SR-Wert	Tensile-Index	Weiter-reißarbeit BI in	Stippen-gehalt	spez. Ener-giebedarf
min	mm	mm	µm	°SR	Nm/g	mNm/m	%	kWh/t
5	0,55	1,08	20,2	31	23,3	738	10,3	75,11
10	0,56	1,08	20,38	31	22,9	709	12,4	96,57
15	0,55	1,05	20,37	33	21,3	732	14,3	143,78
20	0,56	1,08	20,39	27	15,9	583	31,4	178,11

Abb. 41 zeigt die Faserlängenverteilung der Versuche als relative Häufigkeitsverteilung im Vergleich zum konventionell im Desintegrator aufgeschlagenen Ausgangsrohstoff. Anhand der Faserlängenverteilung ist kein Einfluss des Aufschlussverfahrens nachweisbar. Zudem ist keine Änderung der Faserlängenverteilung mit zunehmender Zerfaserungszeit zu erkennen. Eine zunehmende Faserkürzung in Abhängigkeit von der Zeit findet nicht statt.

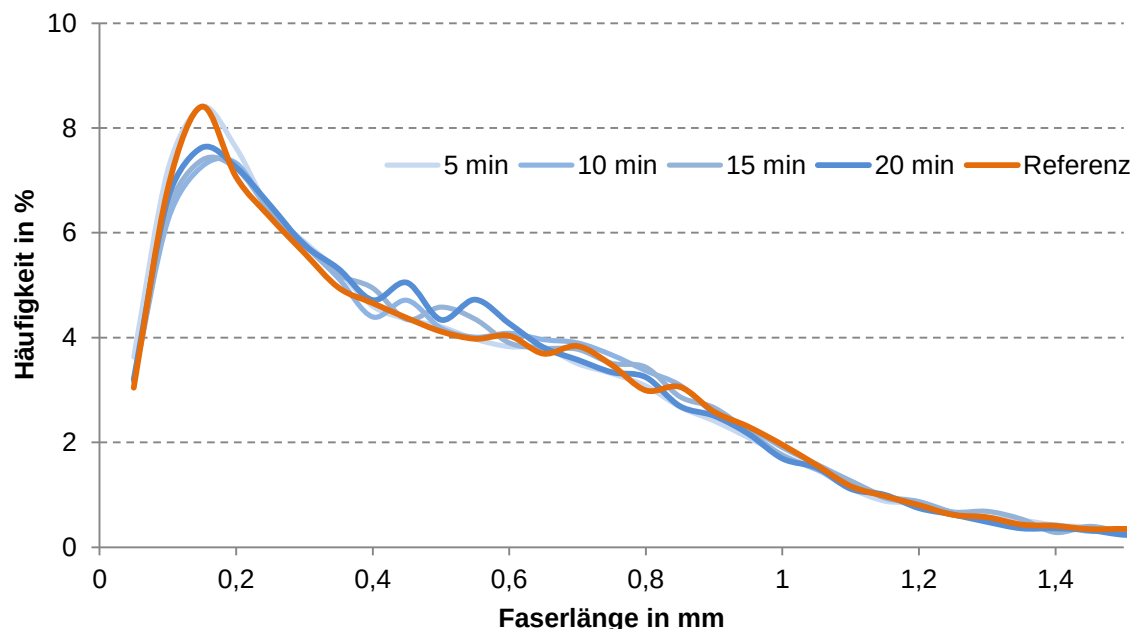


Abb. 41 Relative Faserlängenverteilung Hobart-Pulper

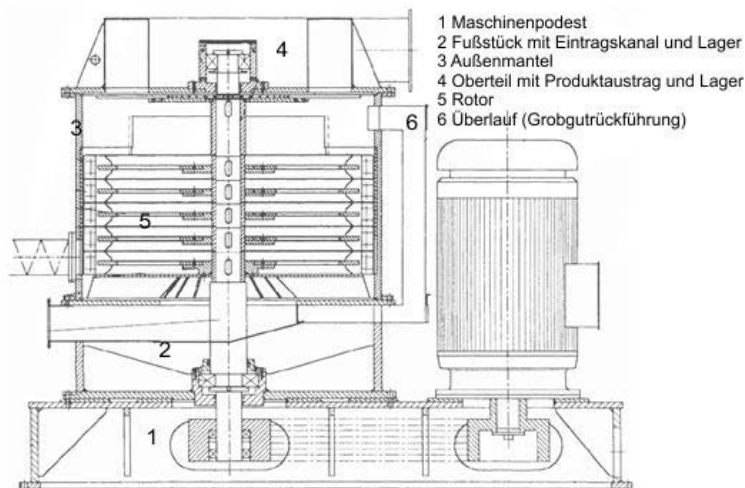
6.4 Trockenzerfaserung mittels Turborotormühle Fa. Görgens

6.4.1 Aggregat und Arbeitsweise

Das Aggregat wurde ursprünglich für die schonende Feinstzerkleinerung von temperaturempfindlichen und schwierig zu vermahlenden Produkten entwickelt und ist als mechanische Luftstrom-Feinprallmühle mit peripherer Mahlbahn eingeordnet. Der Turborotor nutzt für die Zerkleinerung, im Gegensatz zu anderen Bauarten mechanischer Feinprallmühlen, auch die Beanspruchungsmechanismen einer Strahlmühle. Das Zerkleinerungsprinzip beruht auf dem Durchsatz einer großen Luftmenge, die

innerhalb des Mahlraumes in eine hohe Turbulenz versetzt wird. Die Zerkleinerung wird durch das Zusammenwirken von folgenden Wirkprinzipien erreicht:

1. Prallbeanspruchung an einer Körperfläche
2. Druck-Scher-Beanspruchung im Mahlspalt
3. Beanspruchung innerhalb einer rotierenden turbulenten Strömung



Zudem findet während der Verweilzeit eine Trocknung des zu bearbeitenden Materials statt. Abb. 42 verdeutlicht den Aufbau des Aggregats. Das Fasermaterial wurde anschließend in einem Zyklon von der Luft getrennt und in einen Auffangbehälter überführt.

Abb. 42 Aufbau Turborotormühle Fa. Görgens

Für den Großteil der Versuche stand ein Aggregat an der TU Freiberg zur Verfügung. Techn. Daten:

- Mahlraumdurchmesser: 35 cm
- Antriebsleistung: 15 kW

Zur ersten Verifizierung wurde bei unterschiedlichen Rotorumfangsgeschwindigkeiten von 60, 70 und 80 m/s jeweils eine Menge von 500 g vorzerkleinertes Papier (2 x 2 cm) über den Zeitraum von 2,5 Minuten kontinuierlich dem Aggregat zugeführt. Ausgehend von der optischen Bewertung in Verbindung mit einer Fasermessung am Kajaani FiberLab wurde die Stoffqualität bei einer Rotorumfangsgeschwindigkeit von 70 m/s für am Tauglichsten befunden.

In einer weiteren Messreihe wurde bei konstanter Umfangsgeschwindigkeit der Durchsatz erhöht. Die gleiche Menge Faserstoff wurde in einer Zeit von 30 s dem Aggregat zugeführt. Der gewonnene Faserstoff wurde nach Norm 1h vorgequollen. Angesichts sehr schlechter Blattbildungseigenschaften war es notwendig, den Faserstoff im Desintegrator mit 10.000 Umdrehungen zu homogenisieren.

6.4.2 Ergebnisse der Zerfaserungsversuche

Tab. 14 Ergebnisse Fasermessung Trockenzerfaserung

Nr.	Zeit	L (n)	L(l)	Faserbreite	SR- Wert	Tensile- Index	Weiter- reißarbeit BI	Stippen- gehalt	spez. Ener- giebedarf
	min	mm	mm	µm	°SR	Nm/g	mNm/m	%	kWh/t
1	2,5	0,49	0,98	22,87	13	n.m.	32	17,1	129,72
2	2,5 desint.	0,46	0,94	21,13	26	14,1	298		
3	0,5 desint.	0,54	1,09	21,54	25	16,6	385	53,7	88,2
4	0 - Referenz desint.	0,58	1,14	20,41	27	22,7	617		

Der Faserstoff konnte mit den beschriebenen Parametern bei einer Zuführzeit von 2,5 min bis auf 17,1 % Stippengehalt in einem Maschinendurchlauf zerfaserter werden (Tab. 14). Durch die Verkürzung der Zuführzeit konnte der spez. Energiebedarf von 129,7 kWh/t auf 88,2 kWh/t gesenkt werden, jedoch stieg als Folge der Stippengehalt stark auf 53,7 % an. Die mittlere Faserlänge sinkt mit der Verweilzeit im Aggregat ab.

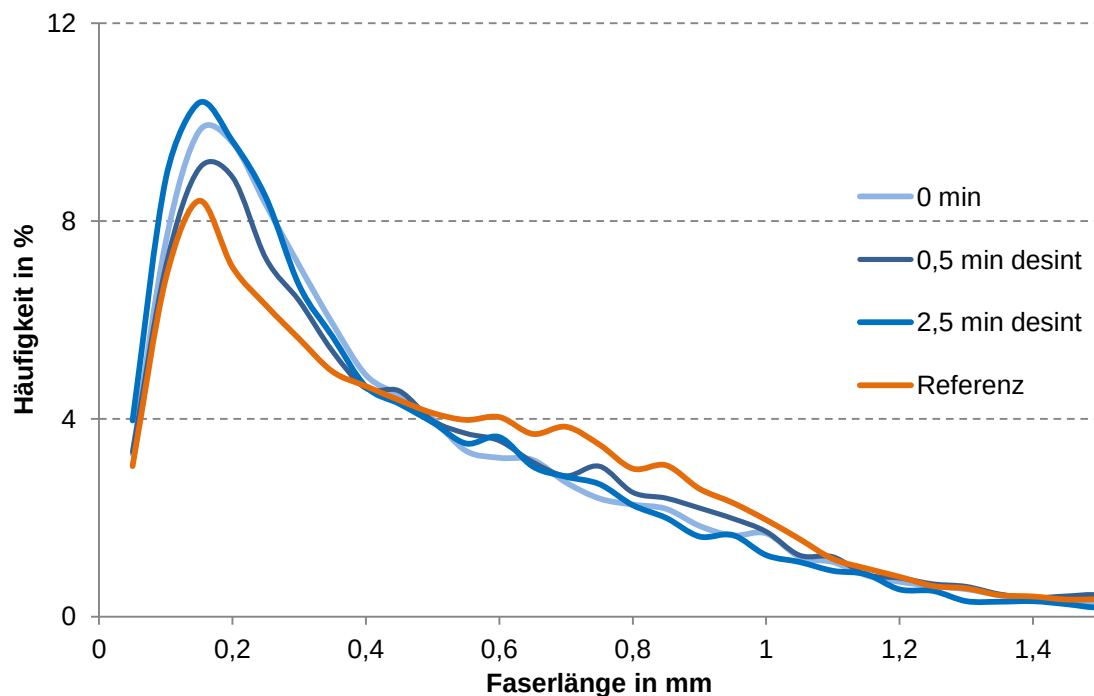


Abb. 43 Faserlängenverteilung der TZF-Versuche als relative Häufigkeitsverteilung

Abb. 43 zeigt die Faserlängenverteilung der Trockenzerfaserungsversuche als relative Häufigkeitsverteilung im Vergleich zum konventionell im Desintegrator aufgeschlagenen Ausgangsrohstoff. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten alternativen Verfahren ist hier ein spürbarer Einfluss auf die Faserlängenverteilung durch das Aggregat festzustellen. Im Bereich von 0,6 bis 1,1 mm Faserlänge sinkt die relative Häufigkeit um ca. 1 %, während im Kurzfaserbereich von 0,1 bis 0,4 mm bei 0,2 mm eine deutlich höhere relative Häufigkeit von 2 % festzustellen ist.

Der Einfluss verringert sich mit verkürzter Behandlungszeit von 0,5 min um ca. 1 % bei 0,2 mm Faserlänge. Die ist aber vorrangig auf den dadurch bedingten höheren

Stippengehalt und die schonendere Auflösung der restlichen Stippen im Desintegrator zurückzuführen.

Es konnte keine mit den anderen Methoden vergleichbare Festigkeitsentwicklung im Prüfblatt nachgewiesen werden. Angesichts der nur etwas geringeren Faserlänge und -Verteilung im Vergleich zum Ausgangsrohstoff ist dies nicht zu erklären.

Der sehr niedrige Entwässerungswiderstand deutet auf einen sehr inaktiven Faserstoff hin. Des Weiteren ergab eine Prüfung des Glührückstandes bei 575°C einen Wert von 27,7 %.

6.4.3 Durchführung und Ergebnisse einer Mahlreihe

Auf Grund des niedrigen Entwässerungswiderstandes und der damit verbundenen geringen Festigkeiten sollte die Aktivierung des Faserstoffes mittels einer Mahlung vorgenommen werden. Diese erfolgte in der Jokro-Mühle. Dazu wurden je 16 g Faserstoff pro Mahlbüchse normgerecht 1 h vorgequollen, anschließend 3 Minuten (10.000 Umdrehungen) desintegriert und über einen Büchnertrichter entwässert. Nach der Mahlung erfolgte ebenfalls eine 3-minütige Desintegration bei 10.000 Umdrehungen, bevor der Faserstoff zur Ausprüfung ins Verteilgerät überführt wurde. Zudem wurde der Faserstoff auch 20.000 Umdrehungen im Desintegrator zum Vergleich ausgeprüft.

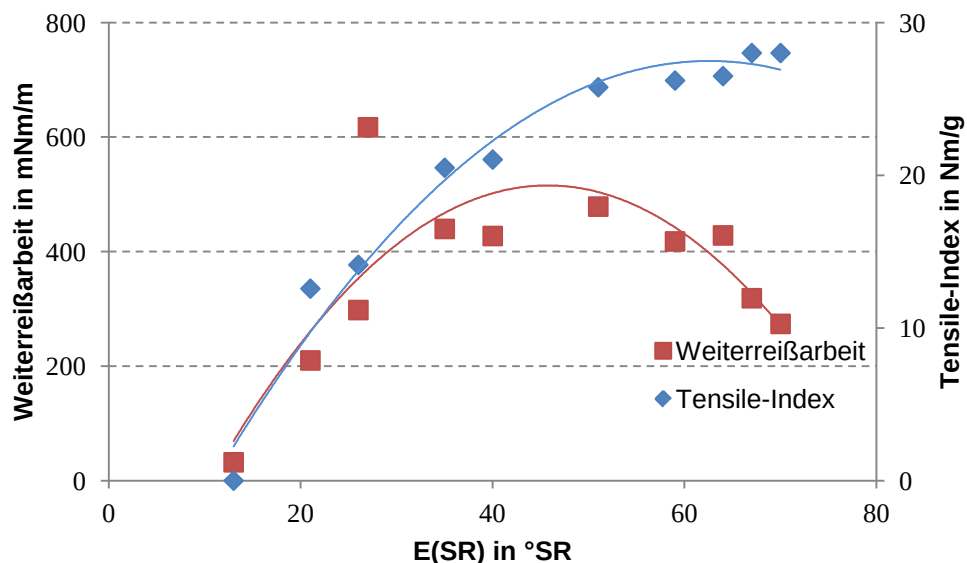


Abb. 44 Festigkeitsentwicklung der Mahlreihe

Die Mahlung erbrachte schon nach kurzer Mahldauer einen verhältnismäßig starken Festigkeitsanstieg. Bereits nach 3 Minuten konnte bei einem Entwässerungswiderstand von 51° SR das beste Verhältnis zwischen Weiterreißarbeit von 479 mNm/m und Tensile-Index von 26,2 Nm/g gemessen werden (Abb. 44). Die abnehmende mittlere Faserlänge hat im weiteren Mahlungsverlauf ein Abnehmen der Weiterreißarbeit zur Folge. Dies kann auch beim Tensile-Index zu einer Abnahme führen, allerdings wirken hier die Zunahme von bindingsaktiven Feinstoffen sowie die zunehmende Faserfibrillierung entgegen. Bis zu einer Mahldauer von 15 min ist ein Anstieg

des Tensile-Index zu sehen, der Mahlpunkt mit 20 min ergab keinen weiteren Anstieg.

Im Vergleich zur industriellen Praxis liegen die erreichten Werte jedoch weit unter den vermuteten Festigkeitspotenzialen. Dies ist vor allem auf die Qualität des verwendeten Faserstoffs zurückzuführen. Die Festigkeiten der aus demselben Rohstoff hergestellten Referenzprobe konnten durch die Mahlung bei allerdings wesentlich höherem Entwässerungswiderstand erreicht werden.

6.4.4 Mikroskopische Faserstoffbewertung

Trotz der Mahlung ließen sich keine mit der industriellen Praxis vergleichbare Festigkeiten generieren. Aus diesem Grund wurden Faserproben unter dem Mikroskop untersucht. Entgegen aller Erwartungen konnten trotz der starken Beanspruchung im Zerfaserungsaggregat nur weitestgehend intakte und nur geringfügig fibrillierte Fasern gefunden werden, die bei entsprechender Mahlung ein hohes Festigkeitspotenzial entfalten sollten. Mit fortschreitender Mahlung ist jedoch ein Aufziehen des in der Suspension enthaltenen Feinstoffs auf die Faser zu beobachten, während die Faser selbst erst nach sehr langer Mahldauer eine signifikante Beanspruchung erfährt. Die Faser fungiert anscheinend als Störstofffänger, was vermutlich als Ursache für den geringen Festigkeitsanstieg im Papier anzusehen ist.

Es wäre zu prüfen, ob durch eine Abtrennung des inaktiven Feinstoffs das Festigkeitspotenzial des Faserstoffs entfaltet werden kann.

6.4.5 Durchführung und Ergebnisse eines Großversuches am Technikum Fa. Görgens

Zur Verifizierung im größeren Maßstab wurde am Technikum der Firma Görgens ein weiterer Versuch mit einer größeren Faserstoffmenge von ca. 20 kg mit einem größeren Aggregat gleicher Bauart durchgeführt.

Techn. Daten:

- Mahlraumdurchmesser: 200 cm
- Antriebsleistung: 800 kW

Bei einem Stippengehalt von 24,4 % sowie einem spez. Energiebedarf von ca. 145 kWh/t konnten eine deutlich schonendere Zerkleinerung und bei gleicher mittlerer Faserlänge höhere Festigkeiten im Vergleich zu den Versuchen in Freiberg erreicht werden.

Tab. 15 Ergebnisse Fasermessung Technikum Görgens

Zeit	L (n)	L(l)	Faserbreite	SR-Wert	Tensile-Index	Weiter-reißarbeit BI	Stippen-gehalt	spez. Ener-giebedarf
min	mm	mm	µm	°SR	Nm/g	mNm/m	%	kWh/t
2,5	0,49	0,98	22,87	13	n.m.	32	17,1	129,7
2,5 desint.	0,46	0,94	21,13	26	14,1	298		
0,5 desint.	0,54	1,09	21,54	25	16,6	385	53,7	88,2
Technikum Görgens	0,53	0,96	19,86	21	18,2	457	22,4	145,0

Zeit	L (n)	L(l)	Faserbreite	SR-Wert	Tensile-Index	Weiter-reißarbeit BI	Stippen-gehalt	spez. Ener-giebedarf
min	mm	mm	µm	°SR	Nm/g	mNm/m	%	kWh/t
0 - Referenz	0,58	1,14	20,41	27	22,7	617		

Wie in Abb. 45 zu sehen, differiert die relative Faserlängenverteilung des Technikumsversuches ebenfalls deutlich zu den Versuchen in Freiberg. Die Faserkürzung im Bereich von 0,6 – 1,1 mm tritt nicht auf. Ein Einfluss des Zerfaserungsaggregates auf die Faserlängenverteilung ist nicht zu erkennen. Dies spiegelt sich auch in etwas höheren Festigkeiten im Vergleich zu den Versuchen in Freiberg wieder. Die geschilderte inaktive Grundcharakteristik des Faserstoffs bleibt aber erhalten und muss durch eine Entfernung des inaktiven Feinstoffs aufgehoben werden.

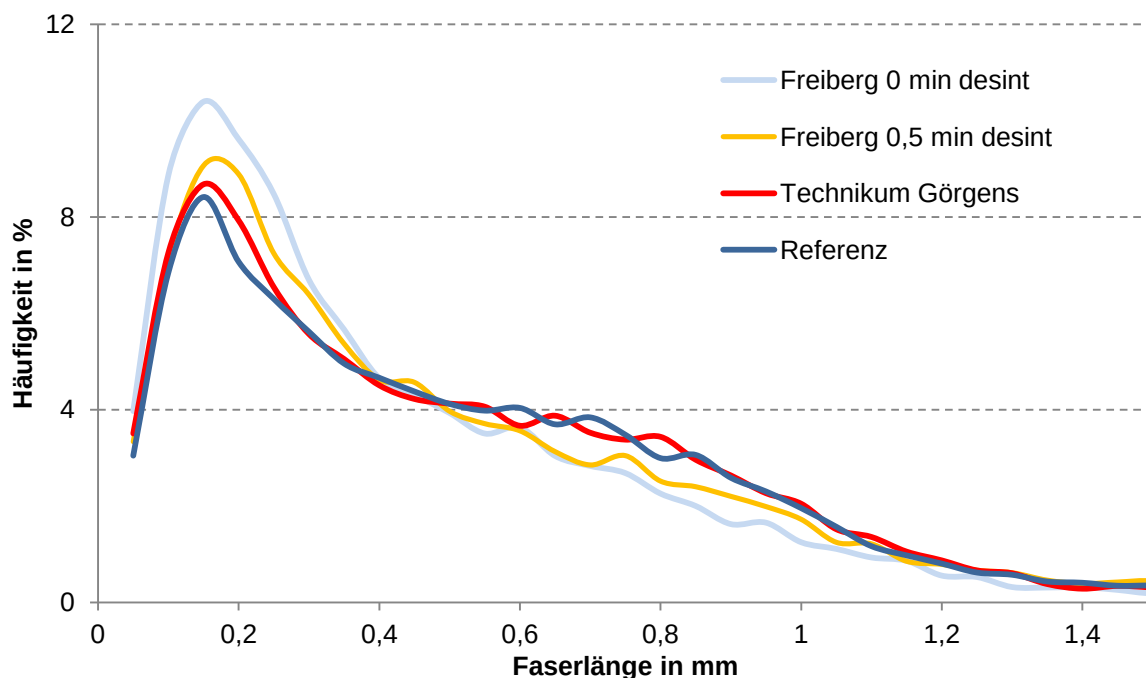


Abb. 45 Vergleich der relativen Faserlängenverteilungen Trockenzerfaserungsversuche

6.5 Vergleich der alternativen Zerfaserungsmethoden mit der industriellen Praxis

6.5.1 Einleitung

Es sollen nun die verschiedenen alternativen Auflöseverfahren der industriellen Praxis gegenübergestellt und hinsichtlich Faserstoffqualität und Energieeinsatz verglichen und bewertet werden. Einschränkend ist zu bemerken, dass dies im Hinblick auf den Faserstoff nur begrenzt möglich ist, da Art und Qualität der eingesetzten Rohstoffe, sowie die Verarbeitungsabläufe differieren.

6.5.2 Faserstoffbewertung

Vergleicht man die relativen Faserlängenverteilungen der verschiedenen Auflöseverfahren Abb. 46, lässt sich erkennen, dass diese trotz ihrer verfahrenstechnischen

Verschiedenheit nur begrenzt Einfluss auf die Faserstoffcharakteristik nehmen. So sind zwischen Extruder, Hobart-Pulper und dem TZF-Technikumsversuch kaum Unterschiede zu erkennen. Die Faserlängenverteilung ist im Wesentlichen vom Rohstoff bestimmt.

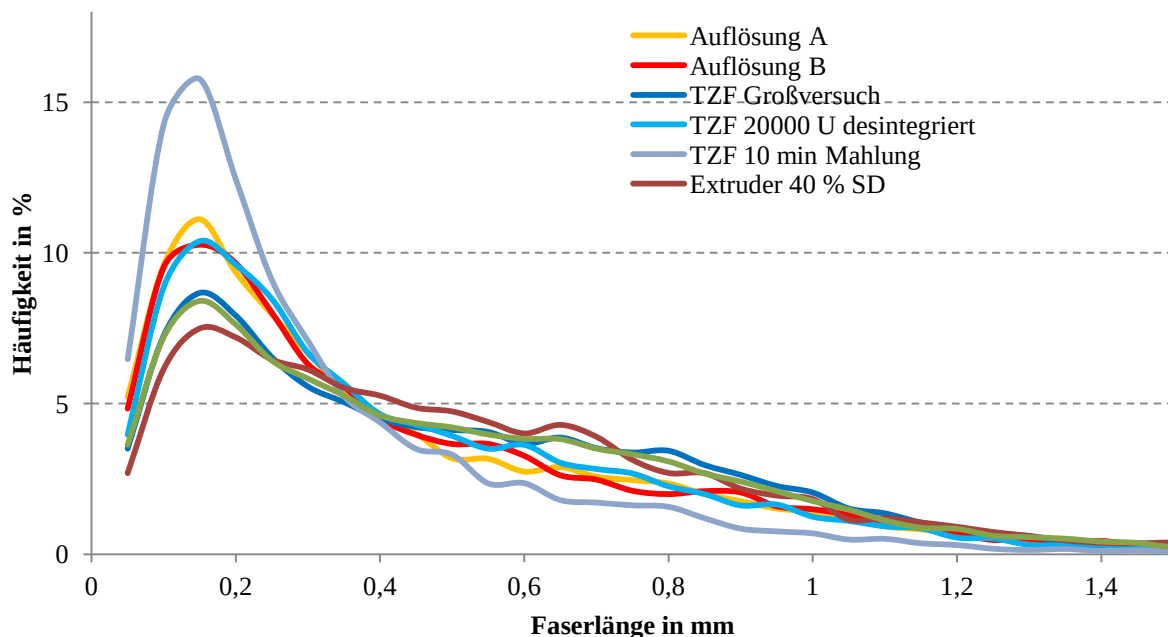


Abb. 46 Vergleich der relativen Faserlängenverteilungen

Wahrscheinlich aufgrund des unterschiedlichen Rohstoffeinsatzes in der zu Referenzzwecken untersuchten Papierfabrik ist dort ein etwas höherer Kurzfasergehalt erkennbar. Im Bereich von 0,4 bis 1,1 mm Faserlänge liegt die relative Häufigkeit im Mittel 1,5 % unter den Werten der alternativen Prozesse.

6.5.3 Vergleich der Festigkeiten

Die mit den unterschiedlichen Verfahren erzeugten Faserstoffe weisen trotz ähnlicher Faserlängenverteilungen starke Festigkeitsunterschiede auf Abb. 47. Es ist ersichtlich, dass der für die Laborversuche eingesetzte Faserstoff in seiner unbehandelten Zusammensetzung gar nicht das Potenzial hat, die in der Industrie erreichten Festigkeiten zu entwickeln.

Eine Ursache hierfür ist der Entwässerungswiderstand. So hat der industrielle Faserstoff direkt nach der Auflösung einen Entwässerungswiderstand von 60 bzw. 55 °SR. Alle alternativ erzeugten Faserstoffe liegen ohne weitere Behandlung in einem Bereich von 21 bis 37 °SR.

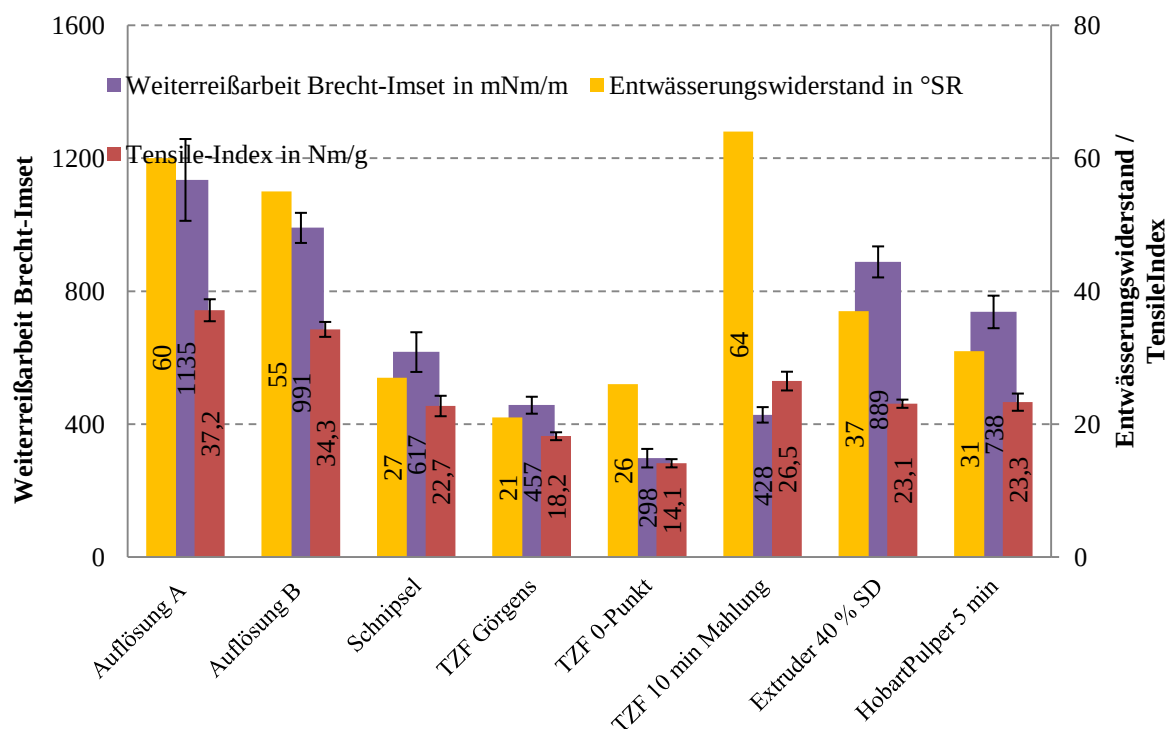


Abb. 47 Vergleich der Festigkeiten in Abhängigkeit vom Entwässerungswiderstand

Mit dem Faserstoff des Hobart-Pulpers sind bei 31 °SR mit 23,3 Nm/g schon 62 % der Zugfestigkeit des Stoffs aus der DIP-Anlagen möglich. Der Extruderfaserstoff liegt mit 37 °SR ebenfalls in diesem Bereich. Im Vergleich mit der im Labor desintegrierten Probe ist zu erkennen, dass der Tensile-Index für beide Verfahren vergleichbare Werte annimmt. Durch eine Erhöhung des Entwässerungswiderstandes sollte sich das Festigkeitspotenzial noch weiter entwickeln lassen.

Eine Ursache für diese großen Unterschiede im Entwässerungswiderstand könnte zudem der Einsatz von chemischen Hilfsstoffen wie Natronlauge in der industriellen Auflösung sein, die Quellung der Fasern unterstützt und somit in einem erhöhten Entwässerungswiderstand resultiert.

Weiteres Potenzial für eine Entwicklung des Festigkeitspotentials bietet eine Reduzierung des Glührückstandes. Dieser lag bei der eingesetzten Mischung von 50 % Zeitung und 50 % Magazinpapier bei 27,7 %. Durch die Verringerung des Füllstoffanteils steht eine größere Faseroberfläche für die Ausbildung von festigkeitsrelevanten Bindungen im Blatt zur Verfügung, wodurch eine höhere Festigkeit erreicht werden kann.

Durch den höheren Entwässerungswiderstand ist die bei der Extruder- und Hobart-Pulperzerfaserung erreichte Weiterreißarbeit höher als bei der im Labor desintegrierten Vergleichsprobe. Mit abnehmenden Füllstoffgehalt sowie steigendem Entwässerungswiderstand wird die Weiterreißarbeit zunächst weiter zunehmen. Angesichts der starken Abhängigkeit von der Faserlänge ist ein Rückgang bei sehr hohen Entwässerungswiderständen und damit verbundener Faserkürzung zu erwarten.

Der trockenzerfaserte Faserstoff zeigt gegenüber den „konventionellen“ nassaufgeschlagenen Faserstoffen ein sehr ungewohntes Verhalten. Die bei einem niedrigen

Entwässerungswiderstand von 26 °SR erwartungsgemäß niedrigen Festigkeiten ließen sich auch durch eine Aktivierungsmahlung nicht im erwarteten Maß entwickeln. Bei einem Entwässerungswiderstand von 64 °SR konnte nur ein Tensile-Index von 26,5 Nm/g gemessen werden.

Da die Faserlängenverteilung nur gering von den anderen Zerkleinerungsmethoden abweicht, muss die Hauptursache hierfür in der Mehl- oder Störstoffkomponente zu suchen sein. Mikroskopaufnahmen zeigen große Mengen Mehlstoff und körnerförmige Agglomerate möglicherweise mineralischen Ursprungs. Das Aufziehen dieser bindungs-inaktiven Faserstoffkomponenten auf die Fasern unterbindet die Ausbildung von bindungs-aktiven Wasserstoffbrückenbindungen. Auf Grund der größeren Anteile an längeren Fasern ist die Ausgangsfestigkeit bei noch niedrigerem Entwässerungswiderstand beim Versuch im Technikum der Fa. Görgens etwas höher.

Möglicherweise kann die Frage nach der Ursache für den hohen Anteil inaktiver Faserstoffbestandteile in der Theorie von Linhart (84) gesucht werden. Da eine Flexibilisierung der Fasern und Fibrillen durch Quellung nicht gegeben ist, kommt es durch die intensive Krafteinwirkung im Zerkleinerungsaggregat zum Zerreißen dieser Bindungen und es wird eine inaktive Mehlstoffkomponente generiert.

Durch das Aufziehen dieser Störstoffkomponente wird die Faser isoliert und somit vor der mechanischen Wirkung der Mahlung geschützt. Somit wird wenig Bindungsfläche durch die Mahlung generiert und keine festigkeitsrelevanten Wasserstoffbrückenbindungen erzeugt.

6.5.4 Vergleich des spez. Energiebedarfs

Abb. 48 zeigt die Gegenüberstellung des spez. Energiebedarfs der verschiedenen Zerkleinerungsmethoden sowie der erreichten Stippengehalte. Eine Annäherung an die aus der industriellen Praxis bekannten Werte konnte mit keinem der alternativen Verfahren im Labor- bzw. kleintechnischen Maßstab erreicht werden.

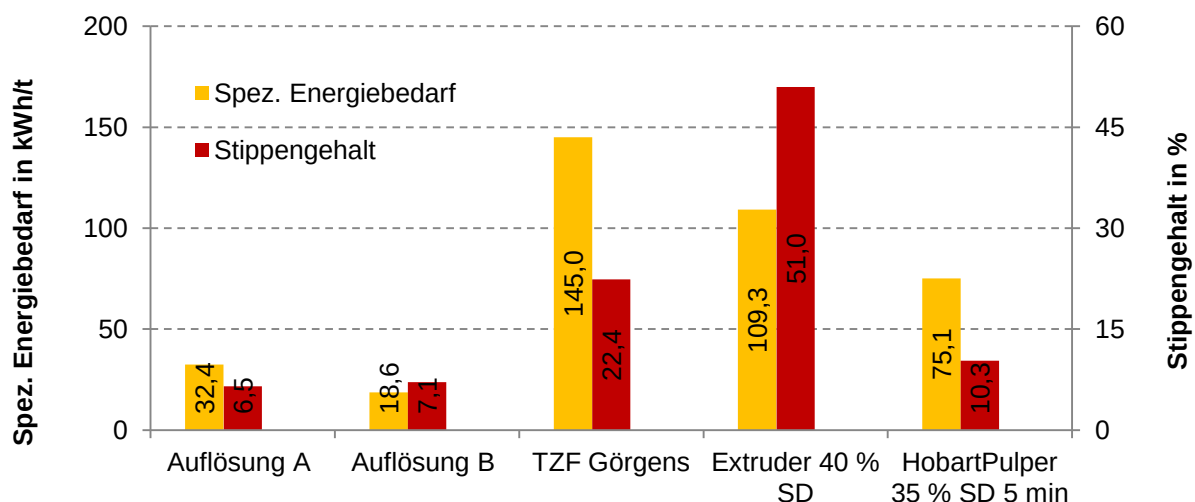


Abb. 48 Vergleich des spez. Energiebedarfs

Den niedrigsten spez. Energiebedarf unter den untersuchten alternativen Verfahren kann der Hobart-Pulper mit 75,1 kWh/t bei 10,3 % Stippengehalt aufweisen, der in Arbeitsweise und Konstruktion den industriellen Verfahren am ähnlichsten ist. Durch

einen Versuch im nächst größeren Maßstab ist eine Reduzierung des spez. Energiebedarfs sehr wahrscheinlich umsetzbar.

Mit dem verwendeten Doppelschneckenextruder konnten bei einem Durchlauf nur 51,0 % Stippengehalt bei 109,3 kWh/t erreicht werden. Dies wurde bei einer Stoffdichte von 40 % erzielt. Verbesserungspotenzial ist durch die Auswahl eines anderen Aggregats vorhanden, welches das Altpapier unter Druck und in einer Stopfschnecke mit steigender Verdichtung behandelt, so dass die innere Reibung im Faserstoff erhöht und somit die aufgewendete Energie besser in den Faserstoff eingebracht und umgesetzt werden kann. Eine eventuell auftretende Faserkürzung muss in diesem Zusammenhang jedoch neu evaluiert werden.

Das Trockenzerfaserungsverfahren zeigt eine starke Abhängigkeit des Stippengehalts vom Faserstoffdurchsatz bzw. von der Verweilzeit, einstellbar durch die Parameter Luftgeschwindigkeit (Ventilatorleistung der Absaugung) sowie Eintragsmenge pro Zeiteinheit. Untersucht wurde nur die Änderung der Eintragsmenge. Bei gleicher Rotorumfangsgeschwindigkeit konnten durch die Verkürzung der Eintragszeit um 4/5 rund 32 % der Energie eingespart werden. Dies hat jedoch einen Anstieg des Stippengehalts von 17,1 auf 53,7 % zur Folge (siehe Anhang).

Ebenso hat eine Änderung der Umfangsgeschwindigkeit, welche in den Vorversuchen betrachtet wurde, einen hohen Einfluss auf den Stippengehalt. Den Einfluss dieser Parameter gilt es weiter zu untersuchen, um einen energetisch optimalen Arbeitspunkt des Aggregats einzustellen.

Eine Reduzierung des spez. Energiebedarfs im großtechnischen Maßstab konnte nicht erreicht werden. Dies ist auf die Limitierung der Eintragsmenge in der Technikumsanlage der Fa. Görgens zurückzuführen. Durch die hohe Volumenzunahme des Faserstoffes im Aggregat konnte dieses auf Grund von Verstopfungsgefahr des nachgeschalteten Zyklons nicht am optimalen Arbeitspunkt betrieben werden. Hier sind weitere Untersuchungen zur Evaluierung der energetischen Gegebenheiten im großtechnischen Maßstab sowie eine spezielle Anpassung des Aggregates zur Zerfaserung von Papier vonnöten.

6.5.5 Verbesserungspotentiale und Anregungen für weitere Untersuchungen

Anhand der mit den alternativen Verfahren erzielten Ergebnisse ist ersichtlich, dass hohe Einsparungspotenziale durch deren Anwendung und Optimierung erschlossen werden können. Es konnte gezeigt werden, dass auch mit unkonventionellen Technologien wie der trockenen Zerfaserung von Altpapier verarbeitungsfähige Faserstoffe erzeugt werden können.

Eine Umsetzung und Weiterentwicklung der trockenen Zerfaserung von Altpapier könnte auch die Notwendigkeit der Umgestaltung anderer papiertechnischer Verfahrensschritte bringen, eine mögliche Applikation wäre z.B. eine Grobreinigung von Faserstoffen im trockenen Zustand. Weiterhin besteht die Möglichkeit der Verringerung des Glührückstandes und einer frühzeitigen Druckfarbenentfernung im trockenen Zustand.

Durch die Extrudertechnologie konnten im Bereich der TMP-Erzeugung durch den MSD ImpressafinerTM von Andritz zum jetzigen Zeitpunkt schon Einsparungspotenziale von 10 – 15 % erschlossen werden. Durch diese Arbeit konnte gezeigt werden,

dass die Faserqualität von Altpapierstoffen durch die Beaufschlagung mit einer hohen Energiedichte auch bei hohen Stoffdichten in einem Extruder keine nachweisbare Beeinträchtigung erfährt. Die Intensivierung des Energieübergangs durch eine Bearbeitung unter Druck und einer höheren Verdichtung bietet demnach große Einsparpotenziale. Zudem sind ähnliche Aggregate für andere verfahrenstechnische Aufgaben (z.B. Schneckenpressen zur Entwässerung von Suspensionen) schon im Einsatz und entsprechende Erfahrungen vorhanden.

Das Grundprinzip des Hobart-Pulpers kann als sehr ausgereift beschrieben werden, eine Umsetzung in die industrielle Praxis ist hier am schnellsten vorstellbar. Möglicherweise besteht sogar die Möglichkeit, bestehende Anlagen nachträglich mit dem veränderten Rührerkonzept auszurüsten.

Es stellt sich bei allen vorgestellten Verfahren jedoch die Frage der Rohstoffvorbehandlung und der vorherigen Störstoffausschleusung. Folien oder gar Ballendrähte würden die Funktion der Aggregate vor allem bei der Trockenzerfaserung und Extrudierung beeinträchtigen oder sogar zum Ausfall führen. Der Störstoffaustrag im trockenen Zustand rückt bei diesen Verfahren verstärkt in den Fokus.

6.6 Deinking

Um das Deinking wirtschaftlicher zu gestalten wurde versucht, die Eigenschaft bestimmter Polymere, Verschmutzungen in und an sich zu lagern zu nutzen.

Für die Druckfarbenentfernung werden Polymerteilchen in die Faserstoffsuspension eingebracht und in einem Rührer vermischt. Dabei lagern sich Druckfarbenpartikel (Offset) an die Polymerteilchen an, wie in Abb. 49 dargestellt, parallel dazu findet eine Zerkleinerung der Partikel statt (Dispergiereffekt). Dieser Vorgang findet bei über 20 % Stoffdichte statt.



Abb. 49 Polymerteilchen vor (links) und nach dem Deinking

6.7 Mahlung

Alternativen zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Mahlung sollen auf der Basis der mechanischen Verfahrenstechnik gemeinsam mit dem Institut für Zerkleinerungsmaschinen der TU Bergakademie Freiberg erörtert und in kleintechnischen Versuchen evaluiert werden. Dabei sollen die Schwachstellen, die beim derzeitigen technischen Stand der Faserstoffmahlung auftreten, überwunden werden. Die Ergebnisse der Schwachstellenanalyse aus derzeitiger Sicht sind in der nachfolgenden Tab. 16 dargestellt.

Tab. 16 Schwachstellenanalyse des Istzustandes der Mahlung

Ursache	Ausweg	Pro	Contra
Die Abmessungen der Arbeitsorgane sind den Faserabmessungen nicht angepaßt.	Feinere Strukturen (Keramik)	Erfolge bei LH-Zellstoffen	Festigkeitsverluste bei NH-Zellstoffen
	Energieübertragung ohne mechanischen Kontakt (Ultraschall, Kavitation)	Interessante Ergebnisse hinsichtlich Fibrillierung	Energiebedarf meist noch höher, als bei konventioneller Technik
Turbulenzen verursachen hohe Umwandlungsverluste („Wasserwirbelbremsen“)	Verringerte Nutquerschnitte	Im Extremfall laminare Strömung möglich (Reynolds)	Feinstoffe werden nicht aus dem Prozeßraum entfernt und der Energiebedarf steigt (Steenberg, Kappa-Prozeß)
	Höhere Stoffdichte	Bessere Festigkeiten	Hohe Umwandlungsverluste (Wärmeenergie), im HC-Bereich bis zu 100% Mehrbedarf an W_{spez}
	Geringere Drehzahl	Weniger Leerlaufverluste	Kein optimaler Mahlsplatt, Festigkeitsverluste, zu geringer Durchsatz

6.7.1 Verwendete Mühlen

Die TU Bergakademie Freiberg stellte für die Zerkleinerung der Papierproben 2 Versuchsmühlen, von der Firma Fritsch (Pulverisette 14 und 15) und das Modell der Firma Retsch (ZM 200), zur Verfügung. Die verwendete Kugelmühle kann sowohl mit trockenen als auch feuchten Gütern bestückt werden.

6.7.2 Fritsch Pulverisette 15

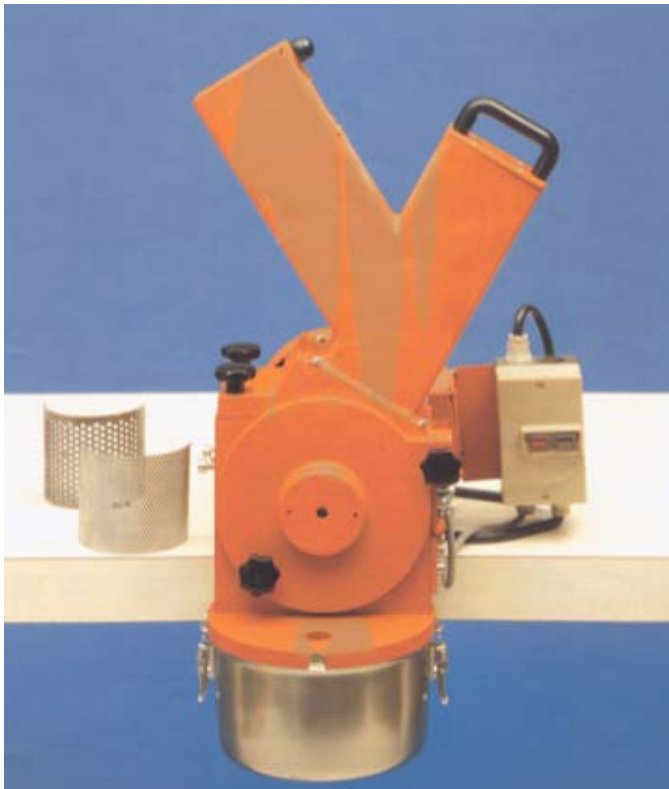


Abb. 50 Fritsch Pulverisette 15 (84)

Anwendungsbereich

Die Fritsch Pulverisette 15 (Abb. 50) wurde konzipiert, um weiche bis mittelharte sowie faserige oder zellulosehaltige Materialien zu zerkleinern. Die zu zerkleinernden Materialien wie Stroh, Folien oder ähnlichem < 10 cm können in ganzer Länge eingegeben werden.

Arbeitsweise

„Der eingriffssichere V-förmige Aufgabetrichter ermöglicht die selbsttätige Zuführung auch größerer Stücke (empfehlenswerte Materialstärke bei härteren Materialien < 5mm). Im Mahlraum schneiden bzw. scheren vier rotierende Messer im Zusammenwirken mit drei feststehenden Messern. Der untere Teil des Mahlraumes ist durch austauschbare Siebeinsätze abgeschlossen (Siebeinsätze sind von 0,25 – 10 mm Lochung erhältlich). Das Scheidegut bleibt nur so lange im Mahlraum, bis die gewünschte Endfeinheit erreicht ist und es durch den ständigen Luftstrom aus dem Mahlraum getragen wird. Als Sammelbehälter dient ein mit zwei Spannverschlüssen angeflanschter Topf bzw. ein durch einen Filterschlauch verbundener 30 l Behälter, wenn größere Mengen zerkleinert werden. Mit einem Holzstößel wird leichtes Material der Mahlkammer zugeführt.“ (84)

Wie in Abb. 51 deutlich zu erkennen, kommt es durch die Fritsch Pulverisette 15 Mühle zu einer Schneid- beziehungsweise Scherbeanspruchung des Mahlgutes (vgl. hierzu Abb. 30)

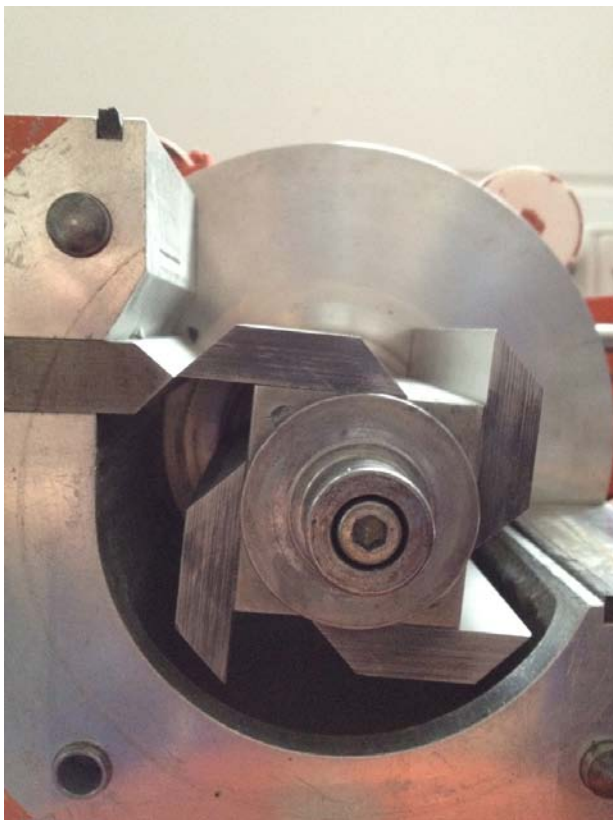


Abb. 51 Mahlraum Fritsch Pulverisette 15

6.7.3 Fritsch Pulverisette 14

Bei der Fritsch Pulverisette 14 handelt es sich um eine Rotorprallmühle, die nach dem in den Kapiteln „Prallmühlen und Rotorprallmühlen“ beschriebenen Prinzip arbeitet.

„Die „Pulverisette 14“ ist eine Rotor-Schnellmühle zur schnellen Zerkleinerung weicher bis mittelharter Proben. Chemikalien, Drogen, Wurzeln, Holz, Leder, Lebensmittel, Getreide, Futtermittel, Gewürze, Zellstoff, Textilien, Kunstharze, Kohle, Erden, Kunststoffe u.ä. können in der Schnellmühle in kurzer Zeit gemahlen werden. Die erreichbare Endfeinheit wird durch einen eingesetzten Siebring bestimmt und kann zwischen 0.08 – 6.0 mm festgelegt werden.“ (84)

6.7.4 Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200

Bei der Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200 handelt es sich um eine Rotorprallmühle, die nach dem in den Kapiteln „Prallmühlen und Rotorprallmühlen“ beschriebenen Prinzip arbeitet.

„Die Zerkleinerung in der Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200 erfolgt durch Prall- und Scherwirkung (vgl. Abb. 30) zwischen Rotor und feststehendem Ringsieb. Das Aufgabegut gelangt durch den Trichter mit Rückspritzschutz auf den Rotor. Durch die Zentrifugalbeschleunigung wird es nach außen geschleudert und beim Auftreffen auf die mit hoher Geschwindigkeit umlaufenden, keilförmigen Rotorzähne vorzerkleinert. Fein zerkleinert werden die Partikel zwischen Rotor und Ringsieb.

Diese zweistufige Zerkleinerung bewirkt die besonders schonende und schnelle Aufbereitung. Das Aufgabegut verweilt nur sehr kurz im Mahlraum, wodurch gewährleistet ist, dass das Mahlgut nicht zu stark erwärmt und zu bestimmende Eigenschaftsmerkmale der Probe nicht verändert werden. Das zerkleinerte Mahlgut wird in dem den Mahlraum umschließenden Auffanggefäß bzw. nachgeschalteten Zyklon oder Papierfilterbeutel gesammelt.“ (85)

6.7.5 Kugelmühle

Bei der Versuchskugelmühle der TU Bergakademie Freiberg handelt es sich um eine Mühle aus Keramik mit 1500 cm³ Volumen. Die eingesetzten Mahlkörperkugeln (25 Stück) hatten einen Durchmesser von 2,5 cm. Weitere Spezifikationen sind in Tab. 17 aufgelistet.

Tab. 17 Spezifikationen Kegelmühle

Mahlraumvolumen	$V_{\text{Mühle}}$	1500	cm ³
Mahlkörperfüllungsgrad	φ_{MK}	0,45	
Mahlkörperschüttvolumen	$V_{\text{Sch, MK}}$	675	cm ³
Mahlkörperschüttdichte	$\rho_{\text{Sch, MK}}$	1,69	g/cm ³
Mahlkörpermasse	m_{MK}	1140,00	g
Mahlkörpervolumen	V_{MK}	473,03	cm ³
Mahlkörperdichte	ρ_{MK}	2,41	g/cm ³

relativer Mahlgutfüllungsgrad	$\varphi_{MG, rel}$	0,3	
Mahlkörperlückenvolumen	$V_{Lü, MK}$	201,66	cm ³
Mahldauer	t	60	min
Drehzahl	n	1,42	1/s
Durchmesser Mühle innen	d_i	13	cm
Durchmesser Mühle außen	d_a	16,5	cm

6.8 Versuchsdurchführung Trockenmahlung

Herstellung der Grobzerkleinerung als „Ausgangsmaterial“ für die Versuchsmühlen (Proben 3-5).

Ausgangsmaterial war das an der Hochschule München vorbereitete, in 2 cm X 2 cm große Stücke zerteilte Gemisch aus 50 % Zeitungspapier und 50 % Katalogpapier. Dieses wurde dann mit Hilfe der Fritsch Pulverisette 15 Laborschneidmühle (4 mm X 4 mm Siebeinsatz) vorzerkleinert. Abb. 52 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigen das Papier vor und nach der Vorzerkleinerung durch die Fritsch Pulverisette 15 Messerschneidmühle.

Abb. 52 Altpapier vor Zerkleinerung



Abb. 53 Altpapier vor Zerkleinerung



Abb. 54 Altpapier nach Zerkleinerung

Das vorzerkleinerte Altpapier (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) stellte das Ausgangsmaterial aller darauffolgenden Trockenmahlungen (Proben 3-5) dar.

Fritsch Pulverisette 14 Mühle mit 500 μm Siebring und 24 Rippen Schlagrotor

Bei der Mahlung mit der Fritsch Pulverisette 14 Mühle wurde das vorzerkleinerte Papier (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) mit dem 24 Rippen Schlagrotor und 500 μm Trapezloch Siebring gemahlen.

Die Abb. 55 zeigt die geöffnete Fritsch Pulverisette 14 Mühle mit den oben genannten Siebring und Schlagrotor Einsätzen.



Abb. 55 500 μm Siebring mit 24 Rippen Schlagrotor

Die Mahlung wurde so lange fortgesetzt, bis ein Mahlgut (in Abb. 55 außerhalb des Siebrings zu erkennen) von ca. 50 g vorhanden war.

Das Mahlgut wurde nach dem Rücktransport an der Hochschule München in Wasser eingerührt und konnte bis zu den nachfolgenden Untersuchungen ca. 72 Stunden im Kühlschrank quellen.

Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200 mit 200 μm Trapezloch Ringsieb und 12-Zahn-Rotor

Bei der Mahlung mit der Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200 wurde das vorzerkleinerte Papier (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) mit Einsatz eines 12-Zahn-Rotor und eines 200 μm Trapezloch Siebrings gemahlen.

Folgende Abb. 56 zeigt die geöffnete Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200 mit automatischem Zuteilgerät und Zyklon für kontinuierliches Mahlen.



Abb. 56 Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200

Die Mahlung wurde so lange fortgesetzt bis ein Mahlgut von ca. 50 g vorhanden war. Das Mahlgut wurde daraufhin in Wasser eingerührt und konnte bis zu den nachfolgenden Untersuchungen ca. 72 Stunden im Kühlschrank quellen.

Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200 mit 120 µm Trapezloch Ringsieb und 12-Zahn-Rotor

Bei der Mahlung mit der Retsch Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200 wurde das vorzerkleinerte Papier (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) mit unter Verwendung des 12-Zahn-Rotors und eines 200 µm Trapezloch Siebrings gemahlen.

Die Mahlung wurde so lange fortgesetzt, bis ein Mahlgut von ca. 50 g vorhanden war. Das Mahlgut wurde daraufhin in Wasser eingerührt und konnte bis zu den nachfolgenden Untersuchungen ca. 72 Stunden im Kühlschrank quellen.

6.9 Versuchsdurchführung Feuchtmahlung

Probenvorbereitung

Ausgangsmaterial waren 300 g des in 2 X 2 cm große Stücke zerteilten Gemischs aus 50 % Zeitungspapier und 50 % Katalogpapier. Jeweils 80 g wurde schrittweise mit einem Aufschlaggerät siehe Abb. 57, unter Zugabe von 2000 ml 10 min aufgeschlagen.

Um eine ausreichende Menge mit einer Stoffdichte von 30 % zu bekommen, wurde die Faser-/Wassersuspension nach dem Aufschlagen mit Hilfe einer Schleudertrommel entwässert.



Abb. 57 Aufschlaggerät

1 kg des Gemischs wurden abgefüllt (30 % Stoffdichte) und für ca. 48 Stunden im Kühlschrank aufbewahrt.

Mahlung mit Versuchs-Kugelmühle der TU Bergakademie Freiberg ca.25cm $\square$ und 40 Keramikkugeln a 2cm $\square$

200 g des „Papiergemischs“ mit einer Stoffdichte von 30 % wurden für eine Stunde in die Kugelmühle gegeben und bei einer konstanten Drehzahl von 1,42 1/s für 60 min gedreht. Abb. 58 zeigt das Ergebnis nach der Mahlung.



Abb. 58 Mit Kugelmühle gemahlener Stoff

Das gemahlene Altpapier (Abb. 58) wurde anschließend von den Keramikugeln getrennt.

Für die folgenden Untersuchungen wurden die Fasern wieder mit Wasser vermischt, um für ca. 72 Stunden zu quellen.

6.9.1 Darstellung und Wertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der alternativen Mahlungsversuche sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 18 Ergebnisse der alternativen Mahlversuche

Aus der Sicht der Verfahrenstechnik ist die Mahlung nichts anderes als ein Zerkleinern

Ergebnisse der alternativen Mahlungen						
Mühle	0-Probe 1 (2cm x 2cm aufgeschlagen)	Messerschneidmühle (4mm x 4mm aufgeschlagen)	Rotorschneidmühle 500µm	Retsch 200µm Retsch Ultrazentrifugalmühle ZM-200	Retsch 120µm Retsch Ultrazentrifugalmühle ZM-200	Kugelmühle
		Fritsch Pulverisette 15	Fritsch Pulverisette 14			
Proben	1	2	3	4	5	6
SR-Wert in SR	56.0	49.0	25.0	35.0	37.0	53.0
Mittelwert	56.0	49.0	25.0	35.0	37.0	53.0
WRV in % feucht	5.48	5.9	5.35	5.73	5.64	5.47
WRV in % trocken	3.82	4.19	3.7	4.05	3.92	3.78
%	43.5	40.8	44.6	41.5	43.9	44.7
RK-Zahl in s	15.2	9.68	2.7	4.2	4.8	10.8
Mittelwert	15.2	9.7	2.7	4.2	4.8	10.8
Flächenmasse in g/m²	75.4	75.9	74.5	74.7	76.2	76.2
Dicke in µm	117	120	122	135	135	118
Rohdichte in g/cm³	0.64	0.63	0.61	0.55	0.56	0.65
Reißlänge in km	3.557	1.709	0.575	0.437	0.450	2.918
Bruchdehnung in %	1.9	1.0	0.5	0.6	0.6	1.9
Tear Index						
DRW in mN Blattzahl	513	163	49	32	24	498
Pendelfaktor						
Tear Index in mN/gm²	6.81	2.15	0.66	0.43	0.31	6.54
Mittlere Faserlänge in mm	1.045	0.659	0.568	0.482	0.47	0.953
Mittlere Faserbreite in µm	26.5	28.2	27.6	26.5	25.9	26.4

Im Rahmen des Projektes konnte diese Lücke nun für die Standardmischung aus 50 % Zeitungen und 50 % Zeitschriften geschlossen werden. Die Messwerte der Untersuchungen sind in der Tabelle 17 aufgeführt. Die nachfolgende Abbildung beschränkt sich in ihrer Aussage auf die Faserlänge, die Zugfestigkeit, und den Tear-Index. Die X-Achse zeigt die Trennteilchengröße der verwendeten Mühlen. Das Ausgangsmaterial besaß eine Größe von 20×20 mm. Dies entspricht den Standardvorgaben für die Laborprüfung von Faserstoffen. Die X-Achse muss nun von rechts nach links ausgewertet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Teilung logarithmisch ist. Die mit dem FiberMaster ermittelte Faserlänge verhält sich etwa linear zur Trennteilchengröße der verwendeten Mühlen. Bereits die Vorzerkleinerung auf 4×4 mm in der Fritsch-Pulverisette 15 führt zu etwa 50 % Festigkeitsverlust bei der Zugfestigkeit und zu 70 % Festigkeitsverlust bei der Durchreißfestigkeit. Die kleinste erreichbaren Teilchengröße lag bei $120 \mu\text{m}$. Dabei und auch bei den vorher erreichten Zerkleinerungsstufen sind die Festigkeitseigenschaften völlig indiskutabel. Die Versuche haben eindeutig bewiesen, dass Wasser (und wahrscheinlich genauer gesagt sogar freitropfbares Wasser) vorhanden sein muss, damit durch Zerkleinerung geschaffene neuen Faseroberflächen später bei der Blattbildung auch wirklich bindungsaktiv sind und Gefügefestigkeit generieren können. Eine trockene Zerkleinerung kombiniert mit einer mit 72 h reichlich ausgelegten Nachquellzeit, kann den Festigkeitsverlust in keiner Weise kompensieren. Der spezifische Energieverbrauch der im Labor durchgeführten Zerkleinerung konnte leider nicht direkt ermittelt werden. Aus den Antriebsdaten der verwendeten Mühlen, der erzeugten Probenmenge und der Leistungsanzeige der Retsch- Ultrazentrifugalmühle kann überschlägig ermittelt werden, dass er etwa bei 10-20 kWh/t lag.

Die Mahlung mit der Kugelmühle erbrachte vergleichsweise gute Ergebnisse. SR-Wert, Zugfestigkeit und Durchreißfestigkeit nahmen nur geringfügig ab. Dies kann damit zusammenhängen, dass die Fasern gekräuselt worden sind, wie sich aus dem Formfaktor erkennen lässt. Insgesamt ist aber kritisch anzumerken, dass es offensichtlich nicht gelungen ist, bei dem orientierenden Versuch genügend Energie in den Faserstoff einzutragen. Es wäre aber möglich, z.B. anstelle der Keramikugeln Stahlkugeln zu verwenden oder die Verweilzeit zu erhöhen. Dazu sind ggf. weitere Versuche nötig.

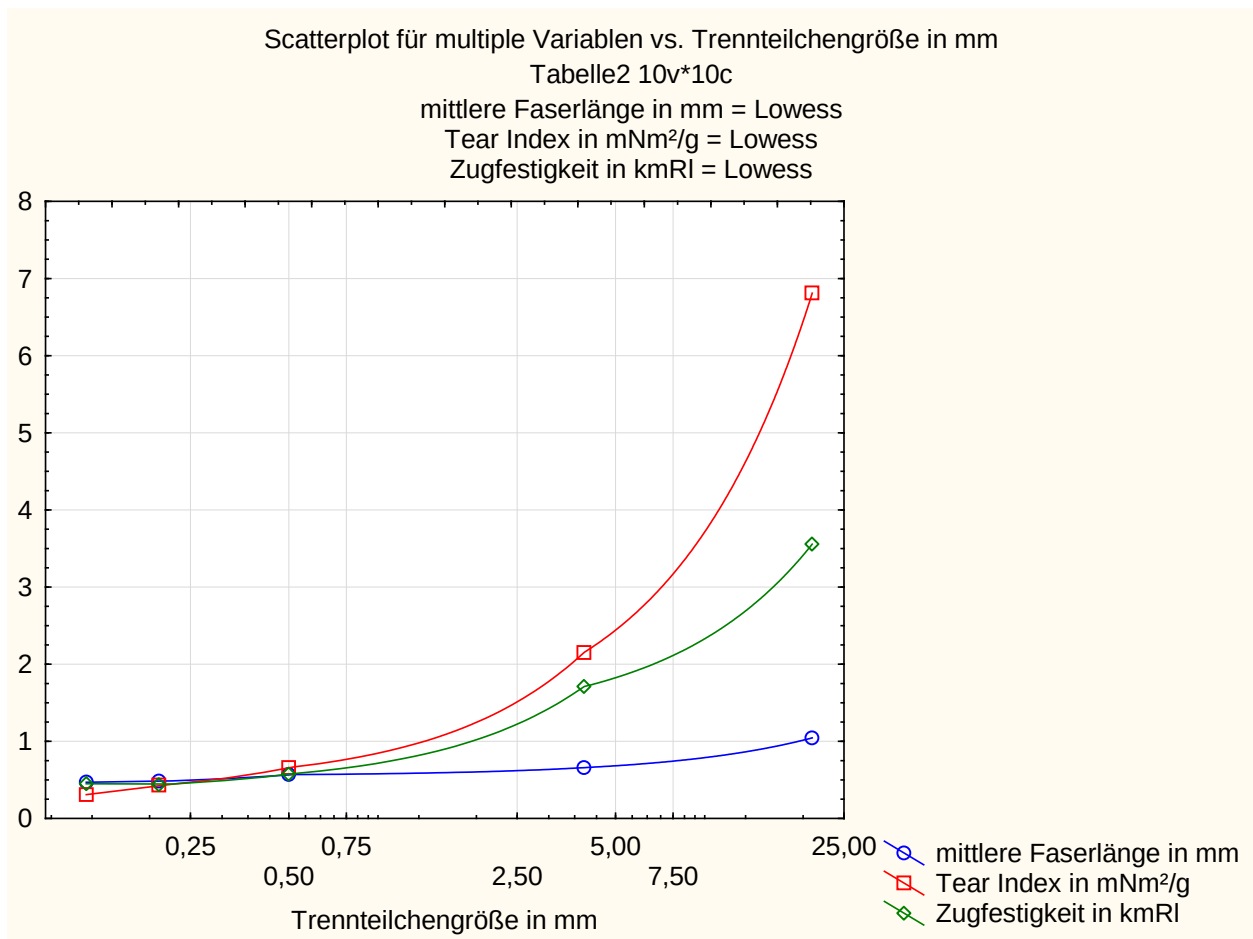


Abb. 59 Veränderung der Eigenschaftskennwerte durch Trockenzerkleinerung in Abhängigkeit der Trennteilchengröße der verwendeten Mühlen

6.9.2 Auswertung der Industrierversuche

Im Rahmen der Industrierversuche wurden Proben aus drei Firmen (nachfolgend mit werk A, B und C bezeichnet) untersucht. Dabei waren nur Daten zur massespezifischen Mahlarbeit verfügbar. Wie in Abschnitt 2.3.6.2 gezeigt, liegt die Effizienz, wenn sie auf dieser Basis bewertet wird, immer günstiger als im Falle der Messung der gesamten Energieaufnahme des Refiners. Das liegt daran, dass bei W_{spez} der Leerlaufleistungsanteil herausgerechnet wird. Damit geht leider die Information verloren, wie gut der Antrieb des Refiners an die Mahlaufgabe (die hauptsächlich benötigte Intensität oder spezifische Mahlkantenbelastung) angepasst ist. Die Abbildung xx zeigt die relative Veränderung der Zugfestigkeit infolge Mahlung. Der ungemahlene Faserstoff hat dabei das Niveau von 100%. Die analoge Form der Darstellung wurde auch für die Veränderung des Tear-Index gewählt. Die zum Vergleich herangezogene Labormahlung wurde einerseits kürzend und andererseits fibrillierend durchgeführt.

- Bedingungen für kürzende Mahlung: Schnittwinkel 15°, B_s 0,5 bis 0,6 Ws/m
- Bedingungen für fibrillierende Mahlung: Schnittwinkel 60°, B_s 0,2 Ws/m

Im Labor trug man die Standardmischung aus 50% Zeitungen und 50% Zeitschriften ein. Bei den Werken A und B handelte es sich um DIP für LWC-Papier.

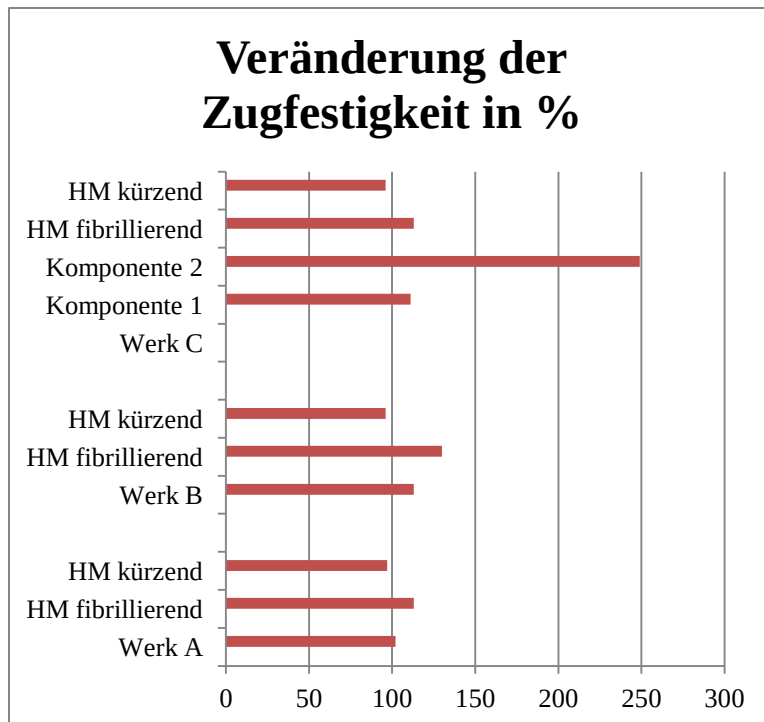


Abb. 60 Relative Änderung der Zugfestigkeit infolge Mahlung

Das Substrat im Falle Werk C, Komponente 2, war Zellstoff und ist damit nicht direkt mit den Altpapiermischungen zu vergleichen. Man erkennt, dass es bei den Industrieproben möglich war, die Zugfestigkeit durch Mahlung zu verbessern. Die fibrillierende Mahlung im Labormaßstab lieferte dabei geringfügig bessere Werte als die Industrierversuche. Bei der kürzenden Mahlung verschlechterte sich die Zugfestigkeit unter das Niveau des ungemahlenen Stoffes. Alle Refiner der betrachteten Werke liefern mit Einstellungen, die dem Substrat sehr gut angepasst sind.

Da die dynamische Festigkeit (Tear-Index) sehr stark von der Faserlänge abhängt, ist es bei Altpapierstoff sehr schwierig, durch Mahlung das Ausgangsniveau des ungemahlenen Faserstoffes zu halten oder gar zu verbessern. Die kürzende Mahlung (Laborversuch) zeigt dann auch eindeutig starke Verluste bei diesem Kennwert und einen Rückgang deutlich unter das Ausgangsniveau. Positiv fällt auf, dass es bei den Praxismustern möglich war, das Ausgangsniveau zu halten oder bei Werk B und C auch noch zu verbessern (bitte beachten: Werk C, Komponente 2 ist Zellstoff). Aus technologischer Sicht ist die Betriebsweise der Refiner in allen drei Werken sehr gut angepasst. Die Labormahlung lieferte auch bei ausgeprägter Fibrillierung nur in einem Fall (Werk A) ein besseres Ergebnis als die Praxis.

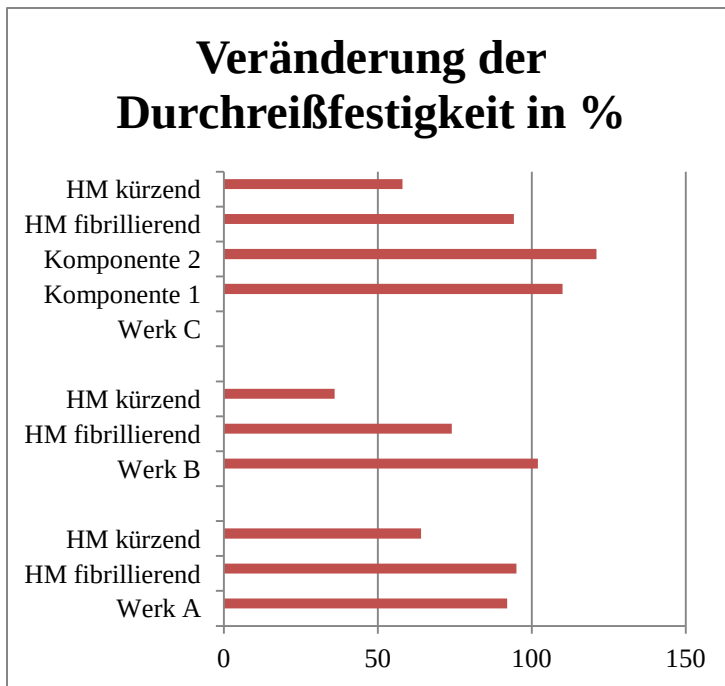


Abb. 61 Relative Änderung der Durchreißfestigkeit infolge Mahlung

Aufgrund der vorgenannten Einschränkungen war die Bewertung der energetischen Effizienz nur über die massespezifische Mahlarbeit möglich. Die bei der Labormahlung an der HM erzielten Werte zwischen 25 % und 35 % Wirkungsgrad bedeuten eine Effizienz zwischen 1% und 2 %, wenn man von der Gesamtleistung des Refiners – die man ja letztlich bezahlen muss – ausgeht. Die besten Praxiswerte liegen bei ca. 20 % Effizienz die schlechtesten etwa bei 3 %. Würde man die Industrierefiner auf der Basis der Gesamtleistung bilanzieren, wären die Werte ebenfalls tendenziell kleiner, selbst wenn man unterstellt, dass die Anpassung der Antriebe an die Mahlaufgabe (Verhältnis Leerlaufleistung/Wirkleistung) vielleicht bei den Praxismaschinen besser ist, als beim Laborrefiner. Eine Verdopplung der energetischen Effizienz wäre ein gewaltiger Fortschritt, selbst wenn auch in diesem Falle der Energieverbrauch den theoretisch notwendigen bei weitem überschreiten würde.

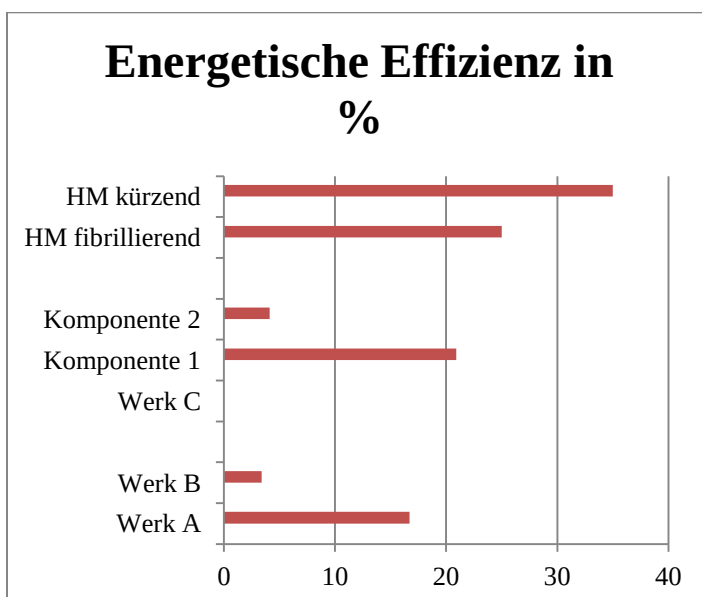


Abb. 62 Vergleich d. energetischen Effizienz d. Labor- u. Praxismahlung auf der Basis von W_{spez}

6.9.3 Zusammenfassung der Versuche der HM

- Mit dem Voith FiberXpress stand ein Laborgerät zur Verfügung, das den Faserstoff viel gründlicher entwässert, als die Zentrifugenmethode, die bei der Bestimmung des WRV zum Einsatz kommt. Nur auf diese Weise ist es möglich, die chemisch gebundene Menge Wasser realistisch zu beschreiben. Die rein mechanische Entwässerung führt bei dem Modellsubstrat aus Zeitungen und Zeitschriften zu Trockengehalten zwischen 65 % und 75 %, bei Zellstoffen bis nahe 80%. Dies entspricht WRV-Werten zwischen 54 % und 25 %. Die Zentrifugenmethode würde hier etwa Werte zwischen 130 % und 100 % liefern.
- Daraus folgt sofort, dass sich beim Nasspressen von Papierbahnen höhere Trockengehalte, als die derzeit für Schuhpressen bekannten, erzielen lassen. Dies wäre ein gewaltiger energetischer Vorteil, wenn man unterstellt, dass 1% Trockengehaltssteigerung in der Pressenpartie einer Energieeinsparung von 4% in der Trockenpartie entspricht (oder einer ebenso hohen Produktivitätssteigerung).
- Auf der Basis dieser extrem leistungsfähigen Entwässerung war es somit möglich, eine Methodik zur Bewertung der energetischen Effizienz von Refinern zu entwickeln.
- Die energetische Effizienz eines Refiners sollte auf der Basis der Gesamtleistungsaufnahme bewertet werden und auf der Basis von W_{spez} . Die Bewertung auf der Basis von W_{spez} liefert einen höheren Kennwert als die Bewertung auf der Basis von P_{ges} . Je größer die Differenz zwischen beiden Kennwerten ist, desto schlechter ist der Antrieb der Mahlmaschine an die Mahlaufgabe angepasst (Intensität, spezifische Mahlkantenbelastung).
- Die energetische Effizienz des Laborrefiners der HM liegt bei 13 % bis 38 % auf der Basis von W_{spez} und 1 % bis 4 % auf der Basis von P_{ges} bei der Mahlung von Zellstoff. Der Unterschied liegt etwa in der Größenordnung einer Zehnerpotenz. Damit ist der Antrieb für diese Art von Mahlung eindeutig überdimensioniert, was im Namen der Wissenschaft toleriert werden sollte, da wir auch im HC-Bereich arbeiten müssen.
- Bei der Analyse der in anderen Industriezweigen eingesetzten Mahlmaschinen wurde erkennbar, dass eine Vielzahl von Ihnen gleichzeitig zur Zerkleinerung auch Trennoperationen ausführt, um Energie einzusparen. Dergleichen ist aus dem Industriezweig nicht bekannt. Ein von uns aus diesem Grunde eingereichter Förderantrag bei der AiF mit genau der Zielstellung der Entwicklung einer Mahlmaschine, die Feingut abtrennen kann, war leider nur mäßig erfolgreich.
- Die Trockenzerfaserung von Altpapier (50 % Zeitungen, 50 % Zeitschriften) vermeidet möglicherweise Turbulenzverluste und spart Energie. Der entstehende Staub hat keinen papiertechnologischen Wert mehr und ist auch nach einer Quelldauer von 72 h bestenfalls als organischer Füllstoff nutzbar. Damit erhärtet sich die Hypothese, dass neu geschaffene Oberflächen an Papierfasern sofort hydratisiert werden müssen, damit sie bindingsaktiv sind und für die Ausbildung der Gefügefestigkeit wirksam.
- Der Vergleich der energetischen Effizienz und der technologischen Eignung hinsichtlich der gewählten Mahlungparameter zwischen der HM Technikumsanlage und industriellen Prozessen in drei ausgewählten Werken zeigte, dass die fibrillierende Variante der Mahlung an der HM den Praxisma-

schinen bei der statischen Festigkeit (Zugfestigkeit) leicht überlegen war. Die kürzende Variante als das andere Extrem war erwartungsgemäß deutlich schlechter, als im Falle der Praxismaschinen. Mit anderen Worten: Die Praxismaschinen laufen nahe am Optimum, was das technologische Ergebnis betrifft.

- Die energetische Effizienz war bei allen Versuchen sehr schlecht, vor allem wenn man berücksichtigt, dass die Bewertung über W_{spez} erfolgte und bei dieser Methode der Leerlaufanteil herausgerechnet ist. Wogegen bei einer Bilanzierung über die Gesamtleistung möglicherweise das Ergebnis um eine Zehnerpotenz schlechter ausfällt.

7 Fazit und Ausblick

Es wurde in den untersuchten Teilprozessen Zerfaserung, Deinking und Mahlung die vermutete sehr schlechte Effizienz aufgezeigt, es besteht ein erheblicher Aufholbedarf zum Stand der Technik in allen Teilprozessen. In der Zerfaserung wurden neue Verfahren auf die erzielbaren Fasereigenschaften hin untersucht und es zeigt sich hier vor allem in der Trockenzerfaserung und in einer veränderten Rührergeometrie ein erhebliches Potential auf.

In der Deinkingtechnologie ist ein neues Verfahren, das bei 20 % Stoffdichte durchgeführt werden kann, getestet und dessen generelle Tauglichkeit für Offsetfarben demonstriert worden. Für den Teilprozess der Mahlung ist ein Messverfahren vorgestellt worden, bei dem die energetische Betrachtung der Mahlprozesse ermöglicht wird.

Literaturverzeichnis

1. **Davison, R.W.** The weak link in paper dry strength. *Tappi journal*. 1972/55, 4, S. 567-573.
2. **Nissan, A. H.** Density of hydrogen bonds in h-bond dominated solids. *Macromolecules*. 1977, S. 660-662.
3. —. On the primacy of the hydrogen bond in paper mechanics. *Tappi journal*. 1990, Bd. 73, 2, S. 159-164.
4. **Stratton, R.A.** *Characterization of fiber-fiber bond strength from paper mechanical properties*. Atlanta, Georgia : Institute of paper science and technology, Juni 1991.
5. **Voith**. pers. Korrespondenz. 2010.
6. **L.P. DeNejo, D.S. Rimai and L.H. Sharpe.** *Fundamentals of adhesion and interfaces*. 1999. ISBN 90-5699-682-7.
7. **Ulrika Andreasson, Lars Wargberg.** *Ink release from printed surfaces - New methodology and initial insights to the true mechanisms behind ink detachment*. [Hrsg.] Fibre Science and Communication Network. 2001.
8. **J.Forsström, M.Eriksson, L. Wagberg.** A new technique for evaluating ink-cellulose interactions. *J. Adhesion Sci. Technol.* 2005, Bd. Vol. 19, No. 9, S. 783-798.
9. *Altpapieraufbereitung und Energieverbrauch.* **Merkel, M.** 7. PTS-Deinking-Symposium München : PTS, 1996. S. 164-168.
10. **Münster, H.** Energiewirtschaftliche Aspekte der Stoffmahlung. *Eochenblatt für Papierfabrikation*. 1983, Bd. 111, 2, S. 49-54.
11. **Bachner, K, Fischer, K, und Bäucker, K.** Zusammenhang zwischen Aufbau der Zellwand und Festigkeitseigenschaften bei Faserstoffen von konventionellen und neuen Aufschlußverfahren. *Das Papier*. 1993, Bd. 47, 10 A, S. 30ff.
12. **Wels, T.** Charakterisierung der Bindungsaktivität von ausgewählten Papierfaserstoffen. TU Dresden : LPT, 1989. unveröffentlichte Arbeit.
13. **Wendt, C.** *Rohstoffcharakterisierung hinsichtlich Pressenentwässerung mittels einer pneumatischen Presse*. 2007. Unveröffentlichte Arbeit der Hochschule München, Studienrichtung PE.
14. **Köhler, A., Albrecht, F.** LEIPA-Schwedt PM 4 –LWC-Produktionslinie der neuen Generation. *Twogether*. 2005, 19.
15. **Münster, H.** *Möglichkeiten der Energieeinsparung bei der Stoffaufbereitung*. Wien : PTS Symposium Energy Management, 2007.
16. **N.N.** *Papier 2011 Ein Leistungsbericht*. Bonn : Verband deutscher Papierfabriken e.V, 2011.
17. *Automatische Sortieranlagen für Altpapier in Deutschland - Technologie, Wirtschaftlichkeit, Qualität.* **Franke, T.** Darmstadt : TU Darmstadt, PMV, 2005.
18. *Projektarbeit.* Heidenau : Papiertechnische Stiftung, . **N.N.** 2007.
19. **Bollegraf.** www.bollegraaf.com. [Online] Juni 2011. <http://www.bollegraaf.com/product-categorieen/drumfeederr>.
20. **System, Bulkahandling.** www.bulkahandlingsystem.com. [Online] Juni 2011. <http://www.bulkahandlingsystem.com>.
21. **BRT.** www.brt.info. [Online] Juni 2011. <http://www.brt.info/de/produkte/sep-o-mat.html>.
22. **Recycling, HAAS.** www.haas-recycling.de. [Online] Juni 2011. <http://www.haas-recycling.de/de/siebtechnik-sternsieb.php>.

23. **SUTCO**. www.sutco.de. [Online] Juni 2011. <http://www.sutco.de>.
24. **Products, TRIO**. www.trioproducts.com. [Online] Juni 2011. <http://www.trioproducts.com>.
25. **Maschinenbau, Hartner**. www.hartner-maschinenbau.de. [Online] Juni 2011. <http://www.hartner-maschinenbau.de/?Produkte:Sortiertechnik>.
26. **Thome-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D.** *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin : TK Verlag, 2010. Bd. 3.
27. **Blasius, K., Escabasse, J.-Y., Ferreira, B.** Verbesserte Ausbeute. *Recycling Magazin*. 2011, Nr. 2.
28. **Weinert, S.** Investigation on Recovered Paper Quality 1.11 in Various Countries. *PTS – CTP Symposium*. München : Papiertechnische Stiftung, 2010.
29. **Pigorsch, E., Blasius, K.** Praxistests zum Altpapier-Monitoring in Papierfabriken mit NIR-Messtechnik. *PTS-Forschungsforum, Heidenau: Papiertechnische Stiftung*. 2011, Mai.
30. **SORT-IT**. www.sortit.eu. [Online] Juni 2011. <http://www.sortit.eu>.
31. **Escabasse, J.-Y., et. al.** www.sortit.eu. [Online] Dezember 2011. <http://www.sortit.eu>. Newsletter, Nr. 4, Juli 2011.
32. **GmbH, pressrelations.** www.pressrelations.de. [Online] Juni 2011. http://www.pressrelations.de/new/standard/result_main.cfm?.
33. **Buchholz, G., Lenzen, C., Hüskens, J.** *Verfahren und Einrichtung zur Aufbereitung eines Papiergemisches*. DE 100 14 872 C2 Deutschland, 24. März 2000.
34. **Dell, T., Lenzen, C., Hüskens, J.** *Verfahren und Einrichtung zur Sortierung eines Papiergemisches*. DE 199 07 983 C2 Deutschland, 25. Februar 1999.
35. **Straetmans, K., Hüskens, J.** *Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung des Weissgrades eines Schüttgutes aus zerkleinerten Papierfraktionen*. EP 1 261 770 B8 EU EU, 03. Februar 2011.
36. **ANPM**. www.anpm.ro. [Online] Juni 2011. http://www.anpm.ro/ghid/data_de/WPS.pdf.
37. **Tieskens.** www.tiskens.de. [Online] Juni 2011. <http://www.tiskens.de/fileadmin/tiskens/downloads/Altpapier.pdf>.
38. **N.N.** *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*. Weinheim : Verlag Chemie, 1972. 4. Auflage, Band 2, S. 81-142..
39. **Dresden, TU**. www.tu-dresden.de. [Online] 2010. <http://www.tu-dresden.de>.
40. **N.N.** *Naturschutz und Reaktorsicherheit: Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereich*. Bonn: BMU : Bundesministerium für Umwelt, 2007. Bericht 1.
41. —. *Ullmann's Encyclopedia of industrial chemistry*. Weinheim : VCH Verlagsgesellschaft mbH , 1988. 6. Auflage, Band B2, Kapitel 23.
42. **Schubert, Heinrich.** *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Weinheim : Wiley-VCH, 2003. Bd. 1. ISBN 3-527-30577-7.
43. **Hemming, W.** *Verfahrenstechnik*. Würzburg : Vogel Verlag, 1993. 7. Aufl..
44. **N.N.** *Society of Mining Engineers: SME Mineral Processing Handbook*. New York : American Institut of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., 1985. Volume 1.
45. **H., Kellerwessel.** *Aufbereitung disperser Feststoffe – Mineralische Stoffe, Sekundärrohstoffe, Abfälle*. Düsseldorf : VDI Verlag, 1991.
46. **N.N.** www.mining-technology.com/projects/raglan. [Online] 2010. <http://www.mining-technology.com/projects/raglan>.

47. —. *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*. Weinheim : Verlag Chemie , 1977. 4. Auflage, Band 14 Verfahrenstechnik.
48. **Reichelt, A.** *Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit Norm-Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände*. München : TÜV Industrie Service GmbH, 2004. Teil 3A – Bergbauliche Hinterlassenschaft.
49. **N.N.** *Beste verfügbare Techniken in Anlagen der Textilindustrie*. Berlin : Umweltbundesamt , 2002.
50. **Döpfkens, E.** *Abwasserbehandlung und Prozesswasserrecycling in der Textilveredelungsindustrie, Dissertation* . Braunschweig : TU Braunschweig, 2004.
51. **N.N.** www.wasser-wissen.de/lexikon/i/industrieabwaesser.htm. [Online] 2010. <http://www.wasser-wissen.de/lexikon/i/industrieabwaesser.htm>.
52. —. 96. *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Festlegung des Zielzustandes für Oberflächengewässer*. s.l. : Bundesgesetzblatt, 2006.
53. —. www.laundry-sustainability.eu/de. [Online] 2010. <http://www.laundry-sustainability.eu/de>.
54. **Kuschnerow J., et.al.** *Waschmittel und Waschprozess*. Braunschweig : TU Braunschweig, 2006.
55. **Hünten, M.** *Abitur-Training Chemie, Grundkurs Chemie 2*. Freising : Stark Verlag, 1997.
56. **N.N.** *Wasch- und Reinigungsmittel, Umwelt Wissen*. München : Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008.
57. —. *Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken in der Nahrungsmittel-, Getränke und Milchindustrie*. Dessau : Umweltbundesamt, 2005.
58. —. *BVT-Merkblatt zu Abwasser- und Abgasbehandlung/ -management in der chemischen Industrie*. Berlin : Umweltbundesamt, 2003.
59. **Michaeli, W., et.al.** *Stoffliches Kunststoff-Recycling – Anlagen, Komponenten, Hersteller*. München : Hanser Verlag, 1993.
60. **Schmitt, B.** *Kunststoffe im produzierenden Gewerbe: Vergleichende ökologische Betrachtung verschiedener Verwertungswege im Bilanzrahmen Luxemburg*. Trier : FH Trier, 2000. Diplomarbeit.
61. **Kopytziok, N.** *Sachgebiet Abfall: Vermeidung ökologischer Belastungen. Die ökologische Wirksamkeit der Vermeidung und Verwertung von Siedlungsabfällen*. Berlin : Rhombos-Verlag, 2001. 2. Auflage.
62. **N.N.** *Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen – Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente am Beispiel von Kupfer und Blei*. Berlin : IZT Institut für Zukunftstudien und Technologiebewertung, 2004.
63. **Goldmann, D., et.al.** *Rückgewinnung von Metallen aus feinkörnigen mineralischen Abfällen*.
64. **N.N.** *Handbuch Bodenwäsche*. Karlsruhe : Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), 1993. Band 11.
65. **Neumaier, H. (Hrsg) et.al.** *Altlasten – Erkennen, Bewerten, Sanieren; 3. grundlegend überarbeitete und ergänzende Auflage*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1996.
66. **Tittel, R.** *Bodenwäsche – Probleme und Grenzen; In: Bodenbehandlung – Stand der Technik und neue Entwicklungen*. s.l. : Fachtagungsband des Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 11. Juni 2002.
67. **Mutschmann, J. et.al.** *Taschenbuch der Wasserversorgung – 50 Jahre*. s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 2007. 14. Auflage.
68. **N.N.** www.huber.de. [Online] 2010. <http://www.huber.de/de/produkte/flotation/>.

69. **Hahn, H.H. et.al.** *Fortschritte bei der Anwendung des Flotationsverfahrens in der Abwasserreinigung; Reihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft.* Karlsruhe : Universität Karlsruhe, 1981.
70. **Hosang, W. et.al.** *Abwassertechnik.* s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 1998. Ausgabe 11.
71. **N.N.** *wecobis.iai.fzk.de.* [Online] Ökologisches Baustoffinformationssystem, 2010. http://wecobis.iai.fzk.de/cms/content/site/wecobis/lang/de/Mitteldichte_Holzfaserplatte.
72. **Erbreich, M.** *Die Aufbereitung und Wiederverwendung von altholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF).* Hamburg : Universität Hamburg, 2004.
73. **Bodner, C. et.al.** *Separation of bone, charcoal, and seeds by chemical flotation.* . s.l. : American Antiquity, 1980. Bd. 45(1), S.110-116.
74. **Küchelmann, C.** *Eine kurze Einführung in die Environmental Archaeology.* s.l. : University of Innsbruck and University of Yerevan.
75. **Vauck W.R.A., Müller H.A.** *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik.* Leipzig : VEB Verlag, 1982.
76. **Tomas, Prof. Dr. J.** Aufbereitungstechnik und Recycling (Vorlesung). 14. 11 2011.
77. **Naujock, Prof. Dr.** *Vorlesungsunterlagen.*
78. **Ivanova, Petya.** *Mechanische Modifizierung prallgemahlener und windgesichteter Mehle unterschiedlicher Weizensorten.* [Dissertation]. Berlin : Petya Ivanova, 2006.
79. **Ivanova, P.** *Mechanische Modifizierung prallgemahlener und windgesichteter Mehle unterschiedlicher Weizensorten.* Berlin : Petya Ivanova, 2006. Dissertation.
80. **Rumpf, H.** *Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft. Chemie-Ing.Techn.* 1965.
81. —. *Mechanische Verfahrenstechnik.* München, Wien : Hanser-Verlag, 1975.
82. **N.N.** *Handbuch Bodenwäsche.* Karlsruhe : Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), 1993. Band 11.
83. **Kellerwessel, H.** *Aufbereitung disperser Feststoffe – Mineralische Stoffe, Sekundärrohstoffe, Abfälle.* Düsseldorf : VDI Verlag, 1991.
84. **GMBH, Fritsch.** Betriebsanleitung: Fritsch Pulverisette 14. Idar-Oberstein : Fritsch GMBH.
85. **GMBH, Retsch.** Betriebsanleitung: Retsch Ultra-Zentrifugalmuehle ZM 200. Haan : Retsch GMBH.