



INFOR-Projekt Nr. 161 R

Möglichkeiten und Grenzen der Kombination der Prozessschritte Zerkleinerung, Dispergierung und Druckfarbentfernung bei der Altpapieraufbereitung und Bewertung des technologischen und wirtschaftlichen Potenzials.

Schlussbericht

Januar 2014

Technische Universität Dresden
Professur für Papiertechnik,

Papiertechnische Stiftung – PTS

Prof. Dr.-Ing. Harald Großmann
Projektbearbeiter:
Dipl.-Ing. Thomas Schrinner

Dr. Frank Miletzky
Projektbearbeiter:
Dipl.-Ing. Steffen Schramm



Abschlussbericht

Möglichkeiten und Grenzen der Kombination der Prozessschritte Zerkleinerung, Dispergierung und Druckfarbenentfernung bei der Altpapieraufbereitung und Bewertung des technologischen und wirtschaftlichen Potenzials.

(INFOR-Projekt Nr. 161 R)

Prof. Dr.-Ing. H. Großmann, TU Dresden

Dr. Frank Miletzky, PTS

Dipl.-Ing. Steffen Schramm, PTS

Dipl.-Ing. Thomas Schrinner, TU Dresden

Januar 2014

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	VIII
1 Ausgangssituation / Problemstellung	1
2 Forschungsziel.....	2
3 Trockenzerfaserung	4
3.1 Hintergrund	4
3.2 Hauptversuch	5
3.2.1 Einleitung.....	5
3.2.2 Verwendete Begriffe, Definitionen und Abkürzungen	5
3.2.3 Versuchsplan und Durchführung.....	6
3.2.4 Stoffbehandlung	7
3.2.5 Blattbildung.....	11
3.2.6 Analysemethoden.....	12
3.2.7 Prüfnormen und Vorschriften	13
3.3 Ergebnisse und Auswertung.....	14
3.4 Zusammenfassung.....	31
4 Dispergierung durch Adsorptionsdeinking.....	32
4.1 Einleitung	32
4.1.1 Hintergrund.....	32
4.1.2 Konventionelle Dispergierung	33
4.2 Voruntersuchungen	34
4.3 Hauptversuch	38
4.3.1 Einleitung.....	38
4.3.2 Verwendete Begriffe, Definitionen und Abkürzungen	38
4.3.3 Versuchsplan und Durchführung.....	39
4.3.4 Analysemethoden	40
4.3.5 Prüfnormen und Vorschriften	41
4.4 Ergebnisse und Auswertung.....	42
4.4.1 Orientierender Vorversuch.....	42
4.4.2 Hauptversuch	45
4.5 Zusammenfassung.....	63

5	Ausblick	64
5.1	Trockenzerkleinerung	64
5.2	Dispergierung durch Adsorptionsdeinking	64
	Literaturverzeichnis.....	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Versuchsplan Trockenzerfaserung mit anschließender Ascheabtrennung ..	6
Abbildung 2:	Versuchsdetails zur Trockenzerfaserung	10
Abbildung 3:	Eigenschaftsänderung durch unterschiedliche Vorzerkleinerung	14
Abbildung 4:	Vergleich der Faserlängenverteilung für die Nass- und Trockenzerfaserung 15	
Abbildung 5:	Trockenzerfaserung in Abhängigkeit der Motordrehfrequenz.....	16
Abbildung 6:	Entwässerungswiderstand (SR) und Wasserrückhaltevermögen (WRV) in Abhängigkeit der Zerfaserungsart (für Zeitungsdruckpapier)	17
Abbildung 7:	Verbesserung des Entwässerungswiderstands und des Wasserrückhalte- vermögens durch kurze Behandlung im Desintegrator (2 min; 6000 U)	17
Abbildung 8:	Reduzierung des Stippengehalts sowie Verbesserung der Festigkeiten durch kurze Behandlung im Desintegrator (2 min; 6000 U).....	18
Abbildung 9:	Festigkeitsentwicklung durch zunehmende Desintegrationsbehandlung...	18
Abbildung 10:	Dickenentwicklung der Laborblätter durch zunehmende Desintegration ...	19
Abbildung 11:	Blatteigenschaften in Abhängigkeit des Feuchtegehalts bei der Trocken- zerfaserung bei 55 Hz Motordrehfrequenz (für Magazinpapier dargestellt)	20
Abbildung 12:	Fasereigenschaften in Abhängigkeit des Feuchtegehalts bei der Trocken- zerfaserung bei 55 Hz Motordrehfrequenz (für Magazinpapier dargestellt)	21
Abbildung 13:	Prozentuale Massenverteilung des Faserstoffs nach der Siebkaskade (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)	22
Abbildung 14:	Faserlängenentwicklung durch Siebkaskade (links) und Vergleich der Faserlänge mit dem nichtgesiebten sowie nasszerfaserten Stoff (rechts) (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)	23
Abbildung 15:	Verlauf des Aschegehalts (Glührückstand bei 5252 °C) nach Siebkaskade (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)	24
Abbildung 16:	Weißgradsteigerung durch Ascheaustrag mittels Siebkaskade im Vergleich zum nichtgesiebten Ausgangsstoff (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)	25

Abbildung 17:	Mikroskopaufnahmen der einzelnen Fraktionen der Siebkaskade (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)	26
Abbildung 18:	Vergleich der Mikroskopaufnahmen für das Zeitungsdruckpapier	27
Abbildung 19:	Reduzierung der Schmutzpunktfläche durch die Trockenzerfaserung (dargestellt für Magazinpapier, Motordrehfrequenz von 55 Hz)	27
Abbildung 20:	Weißgradsteigerung durch Ascheaustrag mittels Luftstrahlsiebe	28
Abbildung 21:	Festigkeitsanstieg durch Austrag der Feinstoff- und Aschefraktion mit Hilfe der Luftstrahlsiebung	29
Abbildung 22:	Weißgradgewinn/ -verlust durch die verschiedenen Trockensiebverfahren gegenüber dem nichtgesiebten Ausgangsstoff (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)	30
Abbildung 23:	Energiebedarf der Trockenzerfaserung in Abhängigkeit der Eingangsfeuchte des Altpapiers(dargestellt für Magazinpapier)	31
Abbildung 24:	Mögliche Kombination von Teilprozessen durch das Adsorptionsdeinking	33
Abbildung 25:	Reduzierung der Schmutzpunktfläche durch Adsorptionsdeinking	36
Abbildung 26:	Undeinkte (links) und adsorptionsdeinkte (rechts) Mikroskopaufnahmen eines Laborblattes aus LWC-Papier mit Offset-Heatset bedruckt (50-fache Vergrößerung)	36
Abbildung 27:	Undeinkte (links) und adsorptionsdeinkte (rechts) Mikroskopaufnahmen eines Laborblattes aus LWC-Papier mit Offset-Heatset bedruckt (200-fache Vergrößerung)	37
Abbildung 28:	Versuchsplan zur alternativen Dispergierung durch Adsorptionsdeinking im Vergleich zur konventionellen Dispergierung und Zerfaserung	39
Abbildung 29:	Eingescannte Bilder der Laborblätter	42
Abbildung 30:	Vergleichende Darstellung der Schmutzpunktfläche (>50 µm + >250 µm)	43
Abbildung 31:	Vergleichende Darstellung der Schmutzpunktfläche in Intervallform	43
Abbildung 32:	Schmutzpunktanalyse und Weißgradentwicklung des Vorversuchs	44
Abbildung 33:	Verbesserung der Dispergiereigenschaften (weitere Reduzierung der Schmutzpunktfläche) durch Wechsel des Granulattyps	45

Abbildung 34:	Einordnung der alternativen Dispergierung durch Vergleich der Schmutzpunktfläche (> 50 µm und > 250 µm) mit den Referenzpunkten..	46
Abbildung 35:	Einordnung der alternativen Dispergierung durch Vergleich der Schmutzpunktfläche (für alle Größenklassen) mit den Referenzpunkten..	46
Abbildung 36:	Bewertung der Druckfarbenablösung durch Vergleich der Schmutzpunktfläche nach Durchführung einer Hyperwäsche	47
Abbildung 37:	Vergleich der Dispergiervverfahren: Schmutzpunktfläche nach Nullpunkt (ohne Weiterbehandlung) sowie nachfolgender Wäsche und Flotation.....	48
Abbildung 38:	Einordnung der alternativen Dispergierung für das Magazinpapier	49
Abbildung 39:	Einordnung der alternativen Dispergierung für das Zeitungsdruckpapier ..	49
Abbildung 40:	Festigkeitsentwicklung durch die verschiedenen Dispergiervverfahren (dargestellt für Magazinpapier)	50
Abbildung 41:	Festigkeitsentwicklung durch die verschiedenen Dispergiervverfahren (dargestellt für Zeitungsdruckpapier)	51
Abbildung 42:	Entwässerungswiderstand (links) und Faserlängenentwicklung (rechts) in Abhängigkeit der Faserstoffbehandlung (dargestellt für Magazinpapier)...	52
Abbildung 43:	Festigkeitsentwicklung durch die verschiedenen Dispergiervverfahren (dargestellt für UV-Druckmuster)	53
Abbildung 44:	Festigkeitsentwicklung bei der alternativen Dispergierung durch Verwendung verschiedener Polymer-Granulate (dargestellt für UV-Druck)	53
Abbildung 45:	Vergleich der alternativen Dispergierung (AD, mit verschiedenen Granulattypen) mit den Referenzpunkten (ND, KD); (für UV-Druck)	55
Abbildung 46:	Vergleich der Dispergiervverfahren für die beiden Hauptversuche	55
Abbildung 47:	Detaillierte Darstellung der Schmutzpunktfläche für den Bereich > 250 µm	56
Abbildung 48:	Darstellung der Schmutzpunktfläche in Abhängigkeit der eingesetzten Granulatmenge (dargestellt für UV-Druckmuster, jeweils 200 g Einwaage)	57

Abbildung 49:	Darstellung der Schmutzpunktfäche in Abhängigkeit der Stoffdichte (dargestellt für UV-Druckmuster, Granulat/Papier-Verhältnis: 1:1)	58
Abbildung 50:	Einfluss der Stoffdichte bei der Zerfaserung mit (links) und ohne (rechts) Granulatzufuhr auf die Schmutzpunktfäche	59
Abbildung 51:	Einfluss der Stoffdichte bei der Zerfaserung mit und ohne Granulatzufuhr auf die großen Schmutzpunkte ($>250\text{ }\mu\text{m}$)	60
Abbildung 52:	Einfluss der Stoffdichte bei der Zerfaserung mit und ohne Granulatzufuhr auf die Schmutzpunktfäche nach der Hyperwäsche	61
Abbildung 53:	Energiebedarf einer Stoffaufbereitung nach Teilprozessen geordnet	62

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
TZ	Trockenzerfaserung
E (SR)	Entwässerungswiderstand nach Schopper Riegler
WRV	Wasserrückhaltevermögen
L (l)	Längenbezogene Faserlänge
lutro	lufttrocken
otro	ofentrocken
ND	Nicht dispergiert
KD	Konventionell dispergiert
AD	Alternativ dispergiert
BAT	Best Available Technology
PTS	Papiertechnische Stiftung
FA	Firma
INGEDE	Internationale Forschungsgemeinschaft Deinking-Technik e. V
WG	Weißgrad
ERIC	Effective Residual Ink Concentration
PP	Polypropylen
PA 6.6	Polyamid 6.6 (Nylon)
PET	Polyethylenterephthalat
EVA	Ethylenvinylacetat
CaCO ₃	Calciumcarbonat
UV	Ultraviolett
Disp.	Dispergierung/dispergiert
hh	Holzhaltig
hf	Holzfrei
SC	Superkalandriert
LWC	Light Weight Coated
MAG	Magazinpapier
ZD	Zeitungsdruckpapier
Des.	Desintegrator
min	Minuten
U	Umdrehungen
Hz	Hertz

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auswahl an Druckprodukten und Dispergiergranulaten (Polymere)	35
Tabelle 2:	Abkürzungen und Eigenschaften der verwendeten Polymere	35

1 Ausgangssituation / Problemstellung

Die im Rahmen des INFOR-Projekts 141 R durchgeführten Untersuchungen offenbarten für die Teilprozesse der Zerkleinerung und der Druckfarbenentfernung erhebliche Einsparpotentiale. Um diese zu nutzen, d. h. die Differenz des aktuellen spezifischen Energieeinsatzes zum theoretischen Minimum deutlich zu reduzieren, wurden alternative Konzepte der Druckfarbenentfernung und der Zerkleinerung entwickelt und deren Einsparpotentiale anhand orientierender Versuche bewertet.

In Anbetracht der niedrigen Stoffdichten der Flotation, welche maßgeblich für die schlechte Energiebilanz der heute überwiegend praktizierten Druckfarbenentfernung verantwortlich sind, wurde ein neu patentiertes Trockenreinigungsverfahren der Textilindustrie als grundsätzlich geeignetes Alternativkonzept identifiziert und auf die Gegebenheiten der Druckfarbenentfernung übertragen. Die Innovation des alternativen Deinking-Verfahrens – nachfolgend Adsorptionsdeinking genannt – besteht im Einsatz von Polymergranulaten, die in der Lage sind, Druckfarbenpartikel an ihre Oberfläche anzulagern und diese anschließend zu entfernen.

Neben dem Nachweis der grundsätzlichen Eignung des Adsorptionsdeinking konnten eine Reihe anderer interessanter Effekte beobachtet werden. Durch die Verwendung der Polymergranulate in einem Labor-Pulper als Hochkonsistenz-Mischapparatur ergeben sich die Vorteile des Adsorptionsdeinking – neben der erheblichen Wassereinsparung im Vergleich zur Flotation – durch die Integration der indirekten Druckfarbenentfernung in den bestehenden Teilprozess der Zerkleinerung. Darüber hinaus wird diese Art der Faserstoffbehandlung von einem Dispergiereffekt begleitet. Eine Kombination des Adsorptionsdeinking mit der Dispergierung – dem energieintensivsten Teilprozess der Altpapieraufbereitung – würde das Einsparpotential des alternativen Verfahrens deutlich erhöhen.

Für die Zerkleinerung wurden ebenfalls neue Verfahren angewandt und hinsichtlich der resultierenden Faserstoffeigenschaften untersucht und bewertet. Insbesondere die Trockenzerkleinerung, bei der die Stoffdichte nicht nur erhöht, sondern gänzlich auf die Wasserzugabe verzichtet wurde, ergab durchaus interessante Ergebnisse. In halbtechnischen Untersuchungen konnte das Fasergefüge des verwendeten Altpapiers gänzlich ohne die Zugabe von Wasser in Einzelfasern zerlegt werden.

In weiterführenden Untersuchungen stellte sich zudem heraus, dass der alternativ zerfaserte Altpapierstoff ohne weiteres einer Trockensortierung zugeführt werden kann. Durch geeignete Siebe oder Trennaggregate können somit auch nachfolgende Prozesse trocken, d. h. ohne Wasserzugabe erfolgen. Insbesondere unerwünschte Bestandteile wie Druckfarbenpartikel könnten so deutlich wirtschaftlicher abgetrennt werden als mit der wasser- und energieintensiven Flotation. Auch durch die trockene Abtrennung anderer Teilfraktionen, wie beispielsweise Fein- oder Füllstoffe, ließe sich eine Eigenschaftsverbesserung des Faserstoffs wassersparender und energieeffizienter realisieren.

2 Forschungsziel

Aufgrund der auftretenden Synergieeffekte bei den untersuchten Alternativverfahren liegt es nahe, das Potential dieser Effekte für eine Kombination entsprechender Teilprozesse sowie einer innovativen, energieeffizienten Prozessgestaltung intensiver zu betrachten. Im Vordergrund steht dabei die Eruierung der Möglichkeiten und Grenzen einer Substitution von insbesondere energieintensiven Teilprozessen durch die genannten Alternativverfahren und eine Verbesserung der energetischen Gesamtbilanz des Altpapieraufbereitungsprozesses.

Ziel des beantragten Projekts war die Abschätzung der Realisierbarkeit einer mit dem Adsorptionsdeinking kombinierten Dispergierung durch die Polymergranulate und der damit einhergehenden Möglichkeit für den Wegfall bzw. der Reduzierung der klassischen Dispergierstufe. Dementsprechend sollen die verwendeten Adsorbentien nicht nur als Druckfarbensammler, sondern vorwiegend als Dispergiergranulate eingesetzt werden.

Für die Trockenzerfaserung galt es, insbesondere das Potenzial einer nachfolgenden trockenen Ascheabtrennung – d. h. einer Entfernung von vor allem Druckfarben, aber auch Füllstoffen – hinsichtlich einer Substitution der herkömmlichen Flotation zu untersuchen.

Die Forschungsziele sollten im Wesentlichen erreicht werden durch

- die Untersuchung des beim Adsorptionsdeinking auftretenden Dispergiereffekts durch Zugabe von Druckfarbenadsorbentien während der Zerfaserung,
- die chemische, granulometrische und gravimetrische Optimierung der Adsorbentien bezüglich ihrer dispergierenden Wirkung,

- die Bewertung der Möglichkeiten und Grenzen einer kombinierten Zerfaserung, Dispergierung und Druckfarbenentfernung in einem Hochkonsistenz-Mischapparat (z. B. Labor-Pulper) durch Verwendung von Adsorbentien, die nicht nur als Druckfarbensammler, sondern gleichzeitig auch als Dispergiergranulate dienen,
- die Prüfung, ob die Faserstoffbehandlung mit geeigneten Adsorbentien zu einem der Wirkung einer Kugelmühle analogen Mahlungseffekt beiträgt,
- die Bewertung des technologischen und energetischen Potentials der Trockenzerfaserung bezüglich der Zerfaserungswirkung und der Stippenfreiheit des behandelten Faserstoffs sowie der dispergierenden Wirkung auf die Druckfarbenpartikel,
- die Bewertung des Potentials der Trockenzerfaserung bezüglich einer nachfolgenden trockenen Abtrennung unerwünschter Stoffkomponenten – insbesondere Druckfarben aber auch Fein- und Füllstoffen – in geeigneten Reinigungs- oder Sortierstufen für eine gezieltere Eigenschaftssteuerung des Faserstoffs,
- die Verifizierung der genannten Lösungsansätze in geeigneten Laboruntersuchungen und gegebenenfalls halbtechnischen Versuchsanlagen,
- Referenzversuche zur Zerfaserung und Dispergierung nach dem Stand der Technik,
- die Definition der Schnittstellen der alternativen Verfahren zu vor- oder nachgeschalteten Teilprozessen,
- die energetische Betrachtung der alternativen Verfahren im Vergleich zu den konventionellen Prozessen,
- die Abschätzung der Erfolgswahrscheinlichkeit weiterer Projekte, deren Ziel die großtechnische Realisierung der zugrunde liegenden Projektidee im Rahmen weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten oder entsprechenden Aufträgen wäre.

3 Trockenzerfaserung

3.1 Hintergrund

Im Vorgängerprojekt INFOR 141 R wurde nach alternativen Konzepten für eine effizientere Zerfaserung und Druckfarbenentfernung gesucht. Ausschlaggebend hierfür war der Nachweis, dass eine erhebliche Differenz zwischen dem Energieeinsatz nach dem Stand der Technik und dem theoretischen Energiebedarf für die genannten Teilprozesse besteht. Dabei zeigte sich, dass diese Lücke nicht durch eine reine Weiterentwicklung der bestehenden Technologien geschlossen werden kann.

Dies liegt vor allem darin begründet, dass die anfänglich hohen Optimierungspotentiale der dem Stand der Technik entsprechenden Prozesse weitestgehend ausgeschöpft wurden und die heute leistungsfähigsten Technologien (BAT) als dementsprechend zuverlässig aber auch ausgereift betrachtet werden können. Für die Zukunft bedeutet dies, dass vermehrt neue Wege beschritten und bahnbrechende Technologien entwickelt werden müssen.

Um den Zerfaserungsprozess wesentlich energieeffizienter zu gestalten, muss nach Technologien gesucht werden, bei der die Zerfaserung bei deutlich höheren Stoffdichten und einem verbesserten Energieeintrag durchgeführt werden kann. Einen denkbaren Lösungsansatz stellt die mechanisch-trockene Zerfaserung des Altpapiers dar. Die Suche nach möglicherweise übertragbaren Lösungen aus anderen Industriebereichen führte zu einem Aggregat, welches ursprünglich für die schonende Feinstzerkleinerung von temperaturempfindlichen und schwierig zu vermahlenden Produkten entwickelt wurde.

Dieses unter der Bezeichnung TurboRotor bekannte Gerät wird allgemein als mechanische Luftstrom-Feinprallmühle mit peripherer Mahlbahn eingeordnet. Die Zerkleinerung des Mahlguts beruht auf dem durch hochturbulente Luftströmungen herbeigeführten Kollisionen mit Einbauten bzw. den Apparatewänden. Durch das Zusammenwirken einer Prallbeanspruchung an einer Körperfläche, einer Druck-Scher-Beanspruchung im Mahlspace und einer Beanspruchung innerhalb einer rotierenden turbulenten Strömung wird der zugeführte Ausgangsstoff zerkleinert. Die Zerkleinerung mit dem TurboRotor kann zudem optional von einer Trocknung des zu bearbeitenden Materials begleitet werden. Nach der Behandlung wird das Ausgangsmaterial mit Hilfe eines Zyklons in einem Auffangbehälter überführt.

Orientierende Zerfaserungsversuche von Altpapier haben gezeigt, dass es mit einem solchen Aggregat möglich ist, das Fasergefüge gänzlich ohne die Zugabe von Wasser zu zerlegen und die gewonnen Einzelfasern für die herkömmliche Weiterverarbeitung zu verwenden. Zudem stellte sich heraus, dass im Anschluss an die Zerfaserung ohne weiteres eine Trockenfraktionierung des zerkleinerten Altpapiers möglich ist. Durch geeignete Siebe oder Trennaggregate kann der Altpapierstoff in eine Kurz- und Langfaser- sowie eine Fein- und Füllstofffraktion unterteilt werden. Auf diese Weise sollen im geplanten Projekt unerwünschte Bestandteile, wie z. B. Druckfarben, selektiv aus dem Prozess ausgeschleust werden. Auch können bestimmte Fraktionen nach Wunsch weiterbehandelt und im Anschluss entsprechend den Anforderungen des Endprodukts wieder zusammengeführt werden.

3.2 Hauptversuch

3.2.1 Einleitung

Für die Versuche wurden Zeitungen und Magazine als Ausgangsstoffe ausgewählt und anschließend separat einer Trockenzerfaserung unterzogen. Diese erfolgte im Technikum der Mahltechnik Görgens GmbH, Dormagen, mit Hilfe eines TurboRotors durchgeführt. Vor der Trockenzerfaserung wurden die Papiere bei der PTS, Heidenau, auf ungefähr 2 x 2 cm vorzerkleinert und gut durchgemischt, um eine einheitliche Stoffzusammensetzung zu gewährleisten. Die der Trockenzerfaserung nachfolgende Trockensortierung mit dem Ziel der Ascheabtrennung (inkl. Druckfarbenentfernung) wurde im Holztechnikum in Freital-Hainsberg durchgeführt. Die Auswertung und Analyse der Stoffproben fand in den Labors der Professur für Papiertechnik an der TU Dresden statt.

3.2.2 Verwendete Begriffe, Definitionen und Abkürzungen

Trockenzerfaserung (TZ)

Zeitungsdruckpapiere (ZD)

Magazinpapiere (Mag)

Luftstrahlsieb 100 bzw. 200 µm (LS 100/200)

Siebkaskade (SK)

Ausgangsstoff (AS)

3.2.3 Versuchsplan und Durchführung

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Versuchsprogramm. Um die Ergebnisse der Trockenzerfaserung einordnen zu können, wurden die verwendeten Druckprodukte zu Vergleichszwecken auch konventionell behandelt. Die konventionelle Stofflösung erfolgte dabei normgerecht im Desintegrator.

Weiterhin wird ersichtlich, dass die Trockensiebung mit Hilfe zwei verschiedener Verfahren durchgeführt wurde. Es kamen sowohl Luftstrahlsiebe als auch eine Siebkaskade (Plannsiebung) zum Einsatz.

Der nach den Verfahrensschritten Trockenzerfaserung sowie konventioneller Zerfaserung vorliegende Faserstoff wurde als Nullprobe bzw. Nullpunkt bezeichnet und ausgeprüft. Der trockenzerfaserte Stoff wurde zudem mittels Trockensiebung weiterverarbeitet. Darüber hinaus wurden ausgewählte Punkte einer Hyperwäsche und einer Flotation unterzogen.

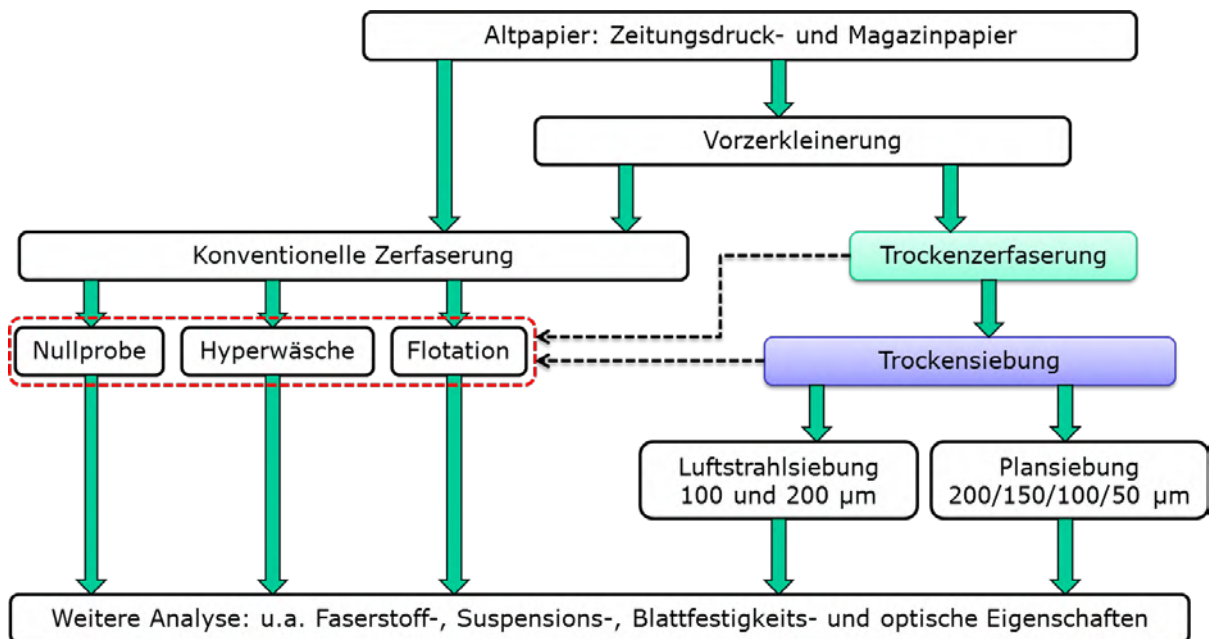


Abbildung 1: Versuchsplan Trockenzerfaserung mit anschließender Ascheabtrennung

Die im Versuchsplan dargestellten Verfahrensschritte und Stoffbehandlungen werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

3.2.4 Stoffbehandlung

Die ausgewählten Faserstoffe wurden den nachfolgenden Stoffbehandlungen unterzogen:

- **Vorzerkleinerung**
- **Trockenzerfaserung**
- **Sortierung/Fraktionierung**
 - **Luftstrahlsieb**
 - **Plansiebung/Siebkaskade**
- **Faserstoffquellung**
- Desintegration (konventionelle Zerkleinerung zu Vergleichszwecken)
- Hyperwäsche
- Flotation

Die Desintegration, Hyperwäsche und Flotation wurden als gängige Verfahrensschritte nach den gültigen Vorschriften, oder zumindest in Anlehnung an diese, durchgeführt. Eine genaue Beschreibung soll daher an dieser Stelle nicht erfolgen. Auf die fettgedruckten und untypischen Behandlungsschritte hingegen muss im Folgenden näher eingegangen werden.

Vorzerkleinerung

Da die Feinheit des mit dem TurboRotor zu zerkleinernden Mahlguts stark von der Größe des Ausgangsstoffs abhängt, wurde das Altpapier auf eine Größe von ungefähr 2 x 2 cm vorzerkleinert. Aufgrund der benötigten Mengen wurde für diesen Zweck eine Kundux-Mühle der PTS in Heidenau verwendet. Diese zerreißt das Altpapier mechanisch, wobei die Größe durch die Wahl des Durchmessers der eingesetzten Lochplatte variiert werden kann. Da diese Vorzerkleinerung mit einer Staubentwicklung einhergeht, wurde der maschinell zerkleinerte Ausgangsstoff mit einer manuellen Zerkleinerung von Hand verglichen und hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung analysiert. Dazu wurden die unterschiedlich vorzerkleinerten Druckprodukte normgerecht im Desintegrator aufgeschlagen, entsprechend weiterverarbeitet und ausgeprüft.

Trockenzerfaserung

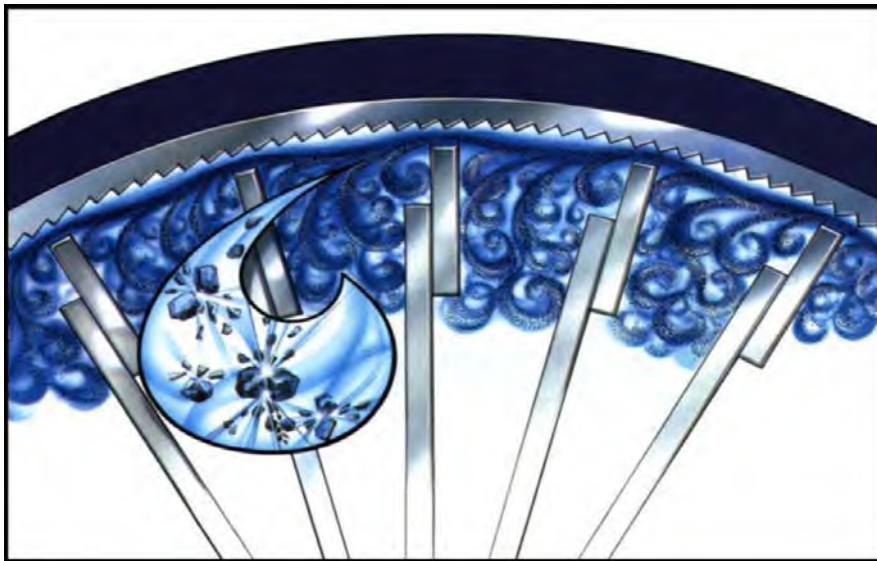
Die Zerkleinerung erfolgte mit dem sogenannten TurboRotor im Technikum der Mahltechnik Görgens GmbH in Dormagen. Der TurboRotor kann als mechanische Luftstrom-Feinprallmühle mit peripherer Mahlbahn eingeordnet werden. Die Zerkleinerung wird durch die Bewegungsbahn des Mahlguts im Aggregat und den dabei auftretenden Beanspruchungen

bestimmt. Die Güte der Zerkleinerung kann dabei durch eine Vielzahl von Einflussparametern gesteuert werden.

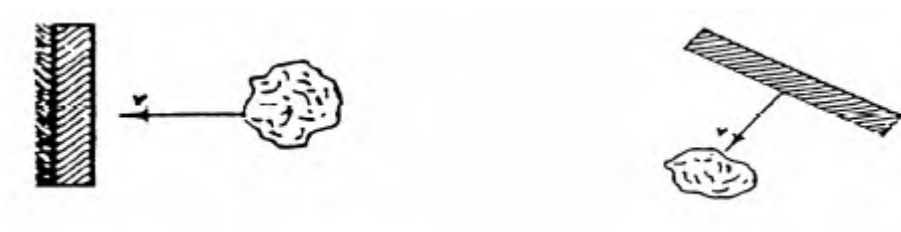
Im Gegensatz zu Rotormühlen die nach dem Prinzip der Schwerkraftförderung arbeiten, wird beim TurboRotor das Mahlgut mit Hilfe eines Luftvolumenstroms von unten nach oben durch die Mahlzone gefördert. Vor dem Eintritt in die Mahlzone erfolgt am Materialeingang eine Homogenisierung des Mahlguts, während sich danach eine separat angetriebene Siehterzone anschließt, wodurch der TurboRotor zu einer echten Siehtermühle wird. Durch die optionale Erwärmung des Luftstroms kann das Mahlgut auch simultan getrocknet werden. Umgekehrt ist auch eine Kühlung möglich.

Die Kräfte, die im TurboRotor auf das zu zerkleinernde Altpapier wirken, sollen im Folgenden vorgestellt werden:

- Stoß-, Prall- und Schlagbelastung zwischen zwei oder mehr Partikeln innerhalb einer rotierenden turbulenten Strömung:



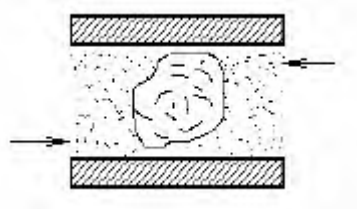
- Stoßbelastungen zwischen den Partikeln und den Mahl- und Zerkleinerungselementen:



- Druck-Scher-Spannungen im Spalt zwischen Mahlplatten und der Innenseite des Stators:



- Spannungen innerhalb einer turbulenten Luftströmung:



Die dargestellten Krafteinwirkungen sind zudem von folgenden Parametern abhängig:

- Luftstromvolumen
- Rotordrehzahl
- Anzahl der Zerkleinerungsstufen im Aggregat
- Anzahl der Mahl- und Zerkleinerungselemente
- Form, Oberflächenbeschaffenheit, Material, Geometrie und Größe der Mahl- und Zerkleinerungselemente
- Oberflächenbeschaffenheit, Profil und Material der Innenseite des Stators
- Siebterart sowie Design
 - o Siebfinger
 - o Siebsieb
- Mahlspace zwischen Rotor und Stator
- Verweilzeit im Aggregat

Auch das Verhalten des Altpapiers innerhalb der Zerkleinerungszone selbst ist für den Zerkleinerungsprozess von Bedeutung. Dementsprechend wurde bei den Versuchen auch die Eingangsfeuchte des Altpapiers variiert (trocken, 30 % und 60 %).

Die Rotordrehzahl wurde mit der Zielstellung einer möglichst stippenfreien Zerkleinerung angepasst und die angestrebte Ausbeute mit dem Trockenzerfaserungsaggregat sollte mindestens 95 % betragen.

Um die allgemeine Abhängigkeit der Trockenzerfaserung von der Motordrehfrequenz zu eruieren, wurde Zeitungsdruckpapier zunächst bei einer geringen (40 Hz), dann bei einer mittleren (50 Hz) und schließlich bei einer hohen Frequenz (60 Hz) behandelt. Im Anschluss daran wurden beide Papiersorten zunächst lufttrocken und anschließend bei einer Feuchte von 30 % bzw. 60 % bei einer Frequenz von 55 Hz zerfasert und nachfolgend gesiebt. Für ausgewählte Punkte wurde die Frequenz zudem auf 60 Hz erhöht bzw. auf 40 Hz reduziert.

Bei einer Frequenz von 55 Hz bzw. 60 Hz lag die Luftgeschwindigkeit zwischen 8 und 9 m/s. Der Durchsatz (Iutro) lag zwischen 12 und 20 kg/t und war für das Magazinpapier aufgrund des Füllstoffgehalts und der geringeren Feuchte etwas höher.

Abbildung 2 fasst noch einmal die wesentlichen Variationsgrößen hinsichtlich des Eingangsstoffs und der Aggregateinstellungen während der Trockenzerfaserung zusammen.

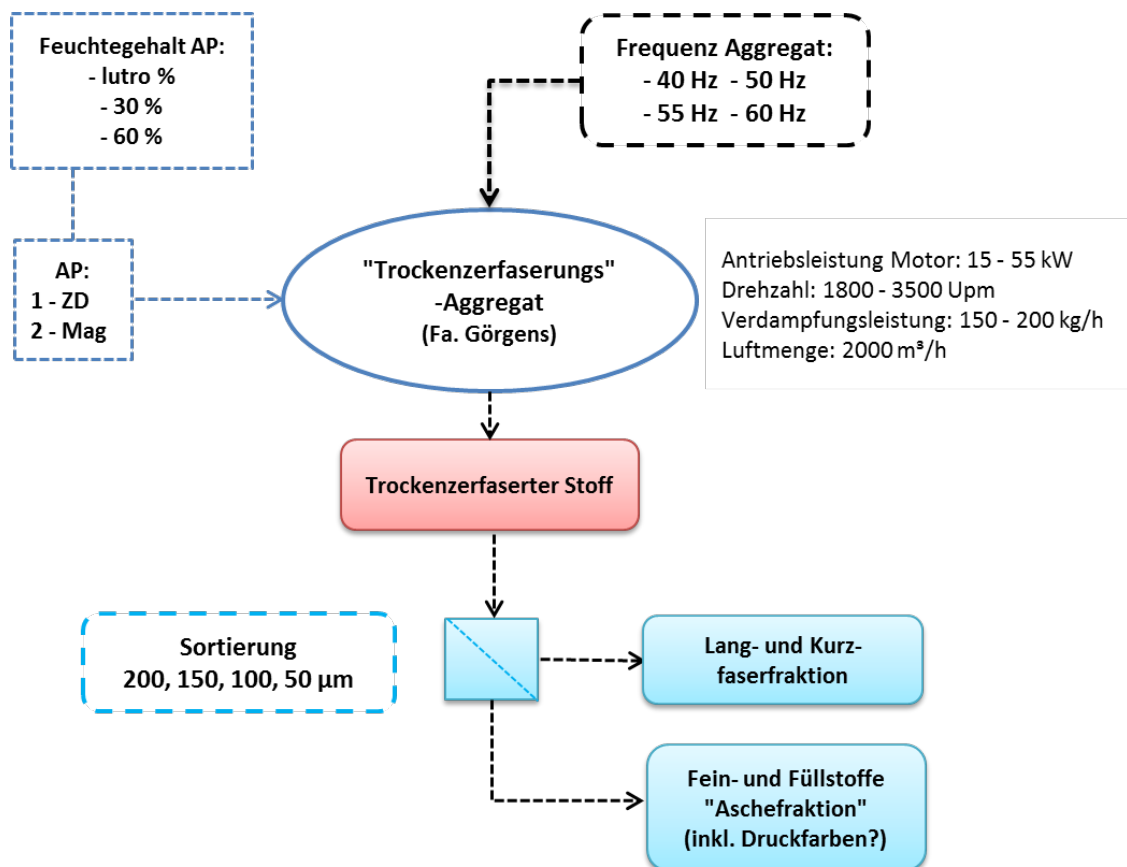


Abbildung 2: Versuchsdetails zur Trockenzerfaserung

Sortierung/Fraktionierung

Die Fraktionierung des trockenzerfaserten Stoffes erfolgte sowohl mit Luftstrahlsieben als auch mit einer Siebkaskade.

Die Siebkaskade (SK) mittels Plansiebung wird mit 4 Sieben – 200, 150, 100 und 50 µm – durchgeführt und erzeugt somit 5 Fraktionen (Durchsatz < 50 µm, Bodenfraktion). Die Luftstrahlsiebung (LS) erfolgt mit den zwei Maschenweiten 100 µm sowie 200 µm.

Im Vorfeld der Versuche wurden die notwendige Siebdauer sowie die benötigten Einwaagen (Faserstoffmengen) für die beiden Aggregate bestimmt.

- Siebkaskade: 20 min (Einwaage Zeitung = 8 g otro; Magazin = 10 g otro)
- Luftstrahlsieb: 8 min (Einwaage Zeitung = 6 bis 8 g otro; Magazin = 10 g otro)

Anhand der geringen Einwaagen wird ersichtlich, dass je Versuchspunkt mehrere Siebungen durchgeführt werden müssen, um eine ausreichende Stoffmenge in allen Fraktionen zu erzeugen. Zudem hätte die Zeitbestimmung für jeden Versuchspunkt explizit durchgeführt werden müssen. Angesichts des ohnehin schon sehr hohen Aufwands wurde darauf verzichtet.

Faserstoffquellung

Das übergeordnete Ziel der Trockenzerfaserung ist der größtmögliche Wasserverzicht während der Stoffaufbereitung. Auch die Entfernung von papierfremden Bestandteilen soll idealerweise ohne Wasserzugabe erfolgen. Erst nach der Stoffreinigung erfolgt nach dem theoretischen Konzept der Trockenzerfaserung die Wasserzugabe in einer Mischbütte, in der die Fasern quellen und anschließend dem Stoffauflauf zugeführt werden.

Dementsprechend wurde der trockenzerfaserte Stoff vor der Blattbildung nur gequollen und nicht im Pulper bzw. Desintegrator behandelt.

3.2.5 Blattbildung

Für die Bewertung der relevanten Stoffeigenschaften wurden Laborblätter von 1,35 g (Schmutzpunkte) und von 2,4 g (Weißgrad, Festigkeiten) gebildet.

Zudem wurden die Sieb- und Sortierrückstände mittels Entwässerung über einem Filterblatt bestimmt. Aufgrund teilweiser geringer Mengen musste hier von der Norm mitunter abgewichen werden.

Die Laborblätter wurden nach dem Rapid-Köthen Verfahren gebildet und sowohl für die Bewertung von optischen als auch von Festigkeitseigenschaften genutzt. Die Blattbildung erfolgte entsprechend der DIN EN ISO 5269-2:2005.

3.2.6 Analysemethoden

Folgende Analysemethoden wurden für die Bewertung herangezogen:

Analyse der Suspensions- und Faserstoffeigenschaften

- Stoffdichte, Trockengehalt und Glührückstand
- Faseranalyse mit dem FiberLab
- Entwässerungswiderstand E (SR)
- Wasserrückhaltevermögen (WRV)

Optische Analyse der Laborblätter

- Schmutzpunktanalyse mit dem DOMAS-Bildanalysesystem
- Weißgradmessung (R 457) mit dem Elrepho
- Verbleibende Restdruckfarbenmenge ERIC (700 nm)

Festigkeitsanalyse der Laborblätter

- Zugversuch (statische Festigkeit)
- Weiterreißarbeit (dynamische Festigkeit)

Sonstige Analysen

- Mikroskopaufnahmen

3.2.7 Prüfnormen und Vorschriften

Verwendete Normen und Vorschriften. Entsprechende Abweichungen wurden an entsprechender Stelle genannt.

Eigenschaft	Norm/Vorschrift
Durchführung	
Assessment of Print Product Recyclability - Deinkability Test -	INGEDE-Methode 11p
Test Sheet Preparation of Pulps and Filtrates from Deinking Processes	INGEDE-Methode 1
Measurement of Optical Characteristics of Pulps and Filtrates from Deinking Processes	INGEDE-Methode 2
Bewertung der Druckfarbenablösung durch Hyperwäsche mit dem Haindl-McNett-Fraktionator	INGEDE-Methode 5
Faserstoff/Suspension	
Entwässerungswiderstand	DIN 5267-1, 10/00
Wasserrückhaltevermögen	ZM IV/33/57
FiberLab	PTS-Methode für Verteilungsanalyse
pH-Wert	DIN 53124
Sonstige	
Stoffdichte	DIN EN ISO 4119, 05/96
Blattbildung	ISO 5269-2, 03/05
Trockengehalt	DIN EN ISO 638, 01/09
Feuchtegehalt	DIN EN 20287, 09/94
Blattprüfung	
Probenvorbehandlung	DIN EN ISO 20187, 11/93
Normklima	DIN 50014
Flächenbezogene Masse	DIN EN ISO 536:, 08/96
Dicke	DIN EN ISO 534, 05/05
Glührückstand 525 °C	DIN 54370: 2007
Tensile-Index	DIN EN ISO 1924-2: 2009-05
Weiterreißarbeit (Brecht-Imset)	DIN 53115
Optische Eigenschaften	
Schmutzpunktanalyse DOMAS	TAPPI-Norm T 213 OM-89, INGEDE-Methode 2
ERIC 700 nm	ISO 22754, TAPPI T567, PAPTAC E.8
Reflexionsfaktor (Weißgrad)	DIN 53145-1, 03/00

3.3 Ergebnisse und Auswertung

Aufgrund der Tatsache, dass die aus dem unterschiedlich vorzerkleinerten Altpapier hergestellten Faserstoffe in ihren Eigenschaften deutlich voneinander abweichen, musste für alle Versuche die gleiche Vorbehandlung gewählt werden. Die Abweichungen resultieren dabei vor allem aus einer verfahrensbedingten Staubentwicklung bei der mechanischen Vorzerkleinerung, welche mit einer Faserkürzung und einem Anstieg des Feinstoffanteils einhergeht. Die Folge sind unter anderem signifikant geringere Festigkeiten im Vergleich zur schonenderen Vorzerkleinerung von Hand, wie die Abbildung 3 verdeutlicht.

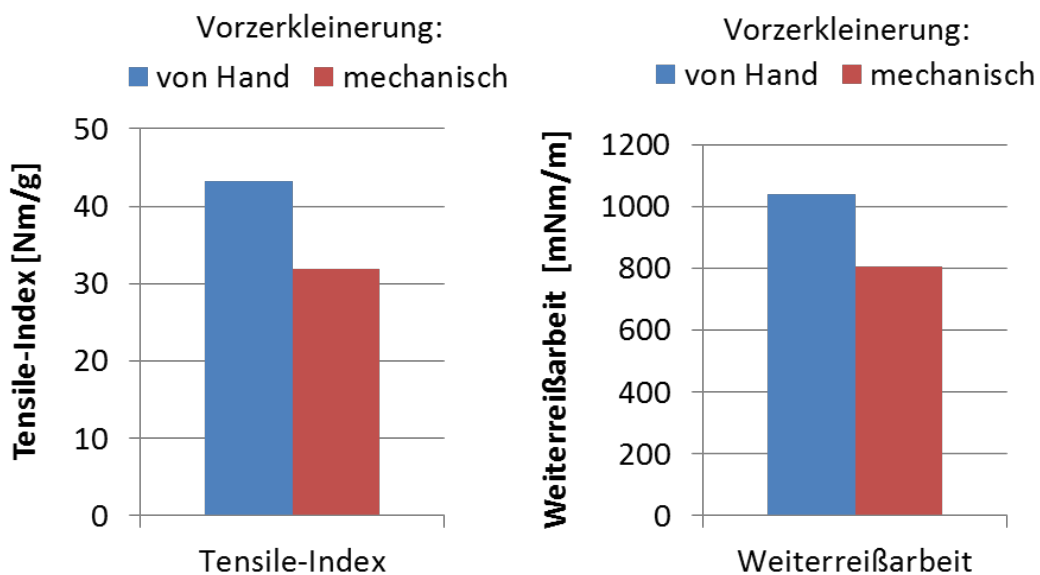


Abbildung 3: Eigenschaftsänderung durch unterschiedliche Vorzerkleinerung

Für den Vergleich der Trockenzerfaserung mit der konventionellen Nassbehandlung diente daher jeweils das mechanisch vorzerkleinerte Altpapier als Ausgangsstoff.

Insgesamt stellte sich für die anvisierten Projektziele bei der Trockenzerfaserung eine Drehfrequenz des Motors von 55 Hz als besonders geeignet heraus. Bei dieser Einstellung war es möglich, einen verarbeitungsfähigen Faserstoff zu generieren, der hinsichtlich der Faserlängenverteilung mit einem konventionell aufbereiteten Faserstoff vergleichbar ist. Dies gilt insbesondere für das Zeitungsdruckpapier. Lediglich im Bereich kurzer Faserlängen kam es zu einem geringfügigen Anstieg der relativen Häufigkeit infolge der mechanisch-trockenen Zerlegung des Blattgefüges. Dieser Effekt zeigte sich beim Magazinpapier aufgrund des höheren Füllstoffgehalts deutlich ausgeprägter und ist auf eine Faserkürzung sowie den damit einhergehenden Feinstoffanstieg zurückzuführen (Abbildung 4).

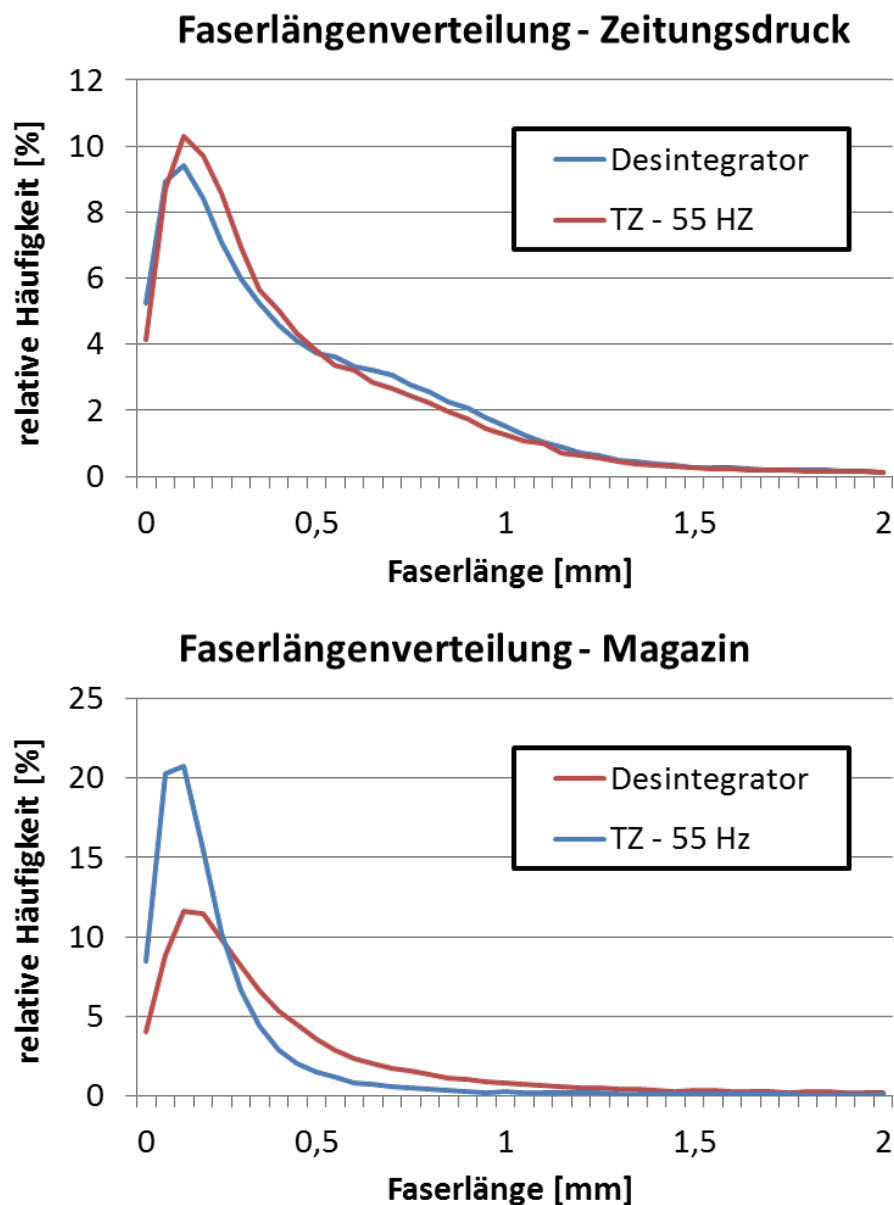


Abbildung 4: Vergleich der Faserlängenverteilung für die Nass- und Trockenzerfaserung

Höhere Motordrehfrequenzen führen aufgrund der fortschreitenden Faserkürzung zu keiner weiteren Verbesserung bzw. sogar zu einer Verschlechterung der Eigenschaften. Deutlich geringe Frequenzen hingegen resultieren in einer unzureichenden Einzelfaserzerlegung des Blattgefüges sowie schlechten Festigkeiten.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Abhängigkeit der Trockenzerfaserung von der Motordrehfrequenz (für Zeitungsdruck dargestellt).

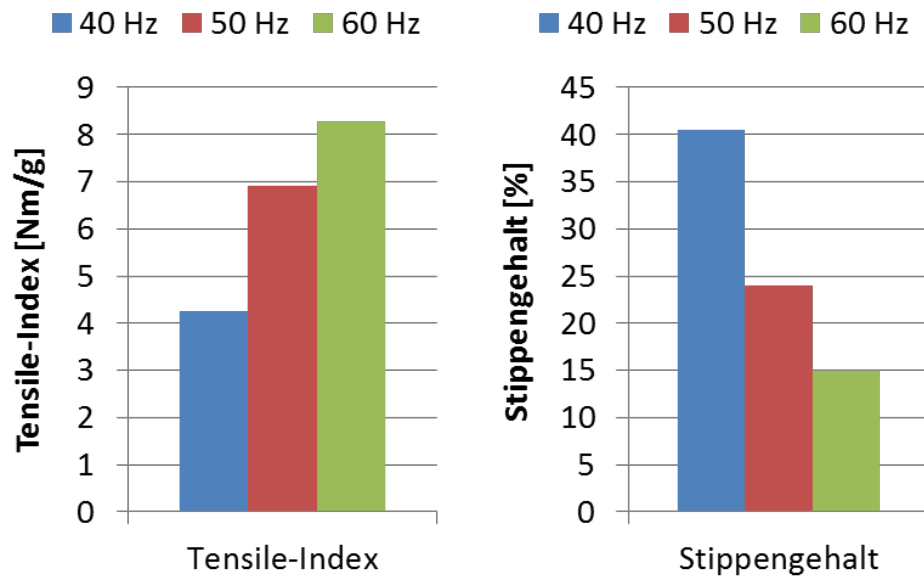


Abbildung 5: Trockenzerfaserung in Abhängigkeit der Motordrehfrequenz

Wie die Abbildung zeigt, können sich mit abnehmendem Stippengehalt homogenere Blattstrukturen ausbilden, wodurch die Festigkeiten mit zunehmender Motordrehfrequenz stark ansteigen. Unabhängig davon weisen die trockenzerfaserten Stoffe ungewöhnliche Eigenschaften im Vergleich zu konventionell zerfaserten Stoffen auf, wie die sehr niedrigen Festigkeiten und die recht hohen Stippengehalte aus Abbildung 5 andeuten.

Der Stippengehalt kann zwar durch eine kurze Desintegration weiter reduziert werden, so dass der Wert wie gefordert unter 5 % beträgt. Auch die Ausbeute der Trockenzerfaserung lag bei allen Versuchspunkten bei mindestens 95 %. Verluste resultierten lediglich aufgrund der Staubentwicklung und geringfügigen Füllstoffanlagerungen im Aggregat. Allerdings lagen Entwässerungswiderstand und Wasserrückhaltvermögen des alternativ aufbereiteten Faserstoffs deutlich unter den Werten der konventionellen Zerfaserung im Labor-Pulper (Abbildung 6).

Eine nachträgliche Faserstoffbehandlung im Desintegrator führte jedoch schon nach kurzer Zeit zu einem signifikanten Anstieg des Entwässerungswiderstands und des Wasserrückhaltevermögens (Abbildung 7). Auch wurde der Stippengehalt weiter reduziert und es kam zu einem Anstieg der Festigkeiten, wenngleich das Niveau der konventionellen Zerfaserung nicht ganz erreicht werden konnte (Abbildung 8).

Die Hauptgründe dafür liegen in einer wesentlich schonenderen Zerfaserung im Labor-Pulper bzw. im Desintegrator. Bei der Trockenzerfaserung hingegen, werden zahlreiche Fibrillen von der Faseroberfläche entfernt und somit deutlich mehr Feinstoff erzeugt. Zudem lagern sich Füllstoffe und Druckpartikel an den Faseroberflächen an und blockieren auf diese Weise potenzielle Kontaktstellen für die Faser-Faser-Bindungen.

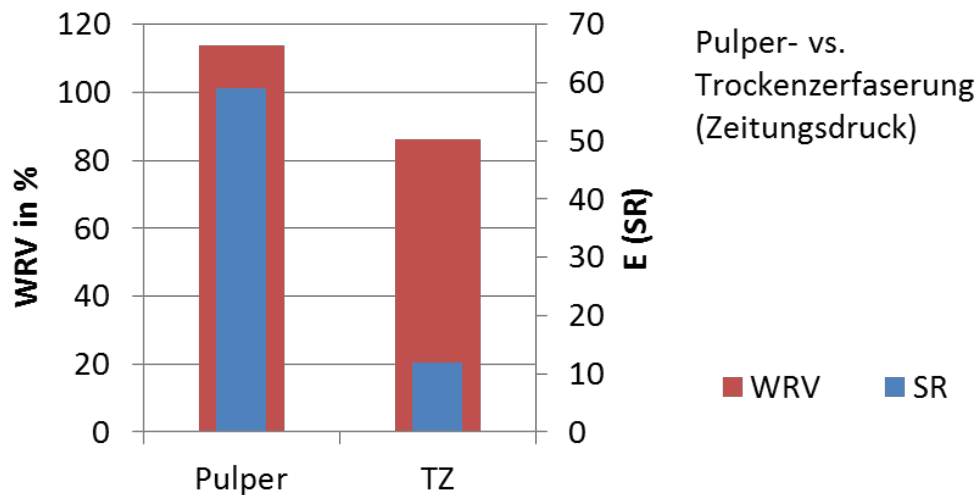


Abbildung 6: Entwässerungswiderstand (SR) und Wasserrückhaltevermögen (WRV) in Abhängigkeit der Zerfaserungsart (für Zeitungsdruckpapier)

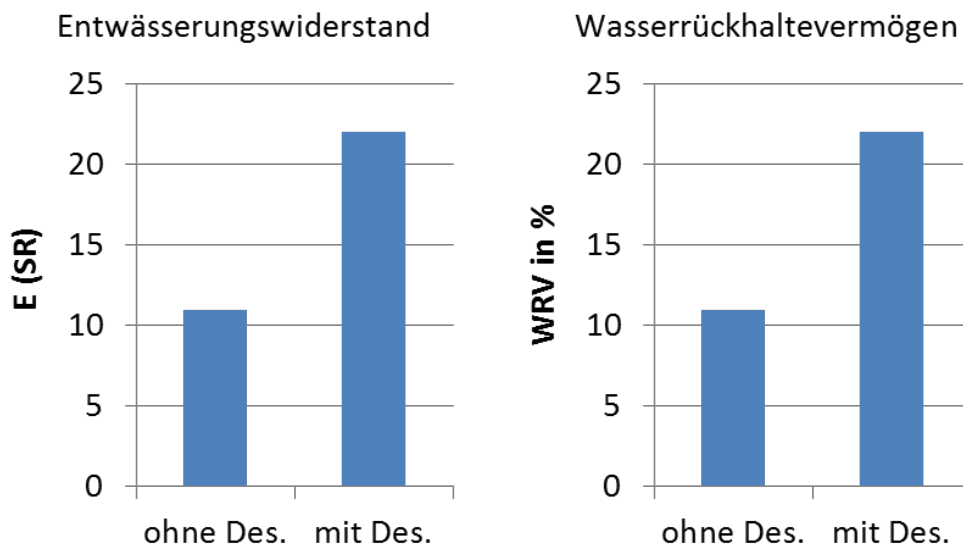


Abbildung 7: Verbesserung des Entwässerungswiderstands und des Wasserrückhaltevermögens durch kurze Behandlung im Desintegrator (2 min; 6000 U)

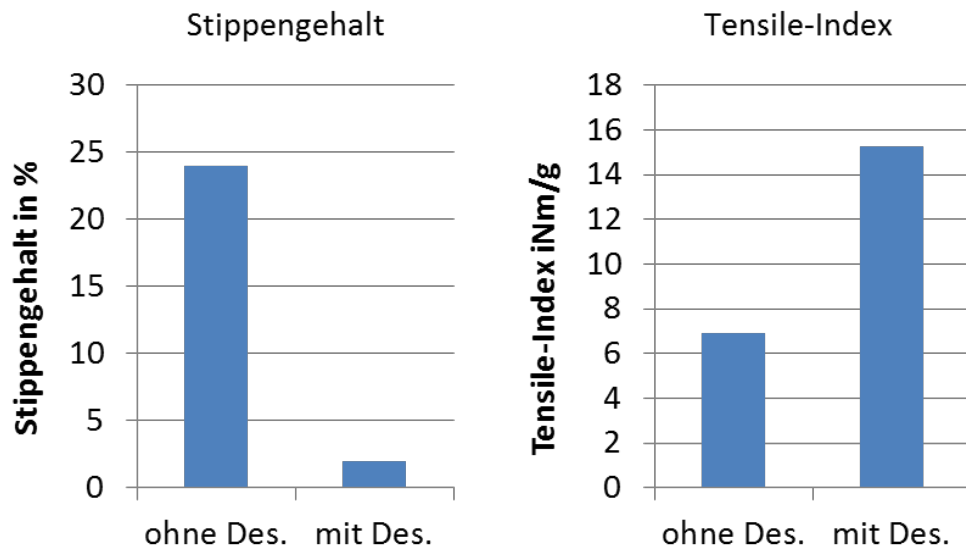


Abbildung 8: Reduzierung des Stippengehalts sowie Verbesserung der Festigkeiten durch kurze Behandlung im Desintegrator (2 min; 6000 U)

Da sich trotz der Verbesserungen durch die Desintegrationsbehandlung insbesondere die Festigkeiten weiterhin signifikant unter dem Niveau der Nasszerfaserung befanden, sollte mit Hilfe eine „Mahlkurve“ eine vollständige Reaktivierung des Faserpotenzials hergestellt werden (wiederum für Zeitungsdruck dargestellt).

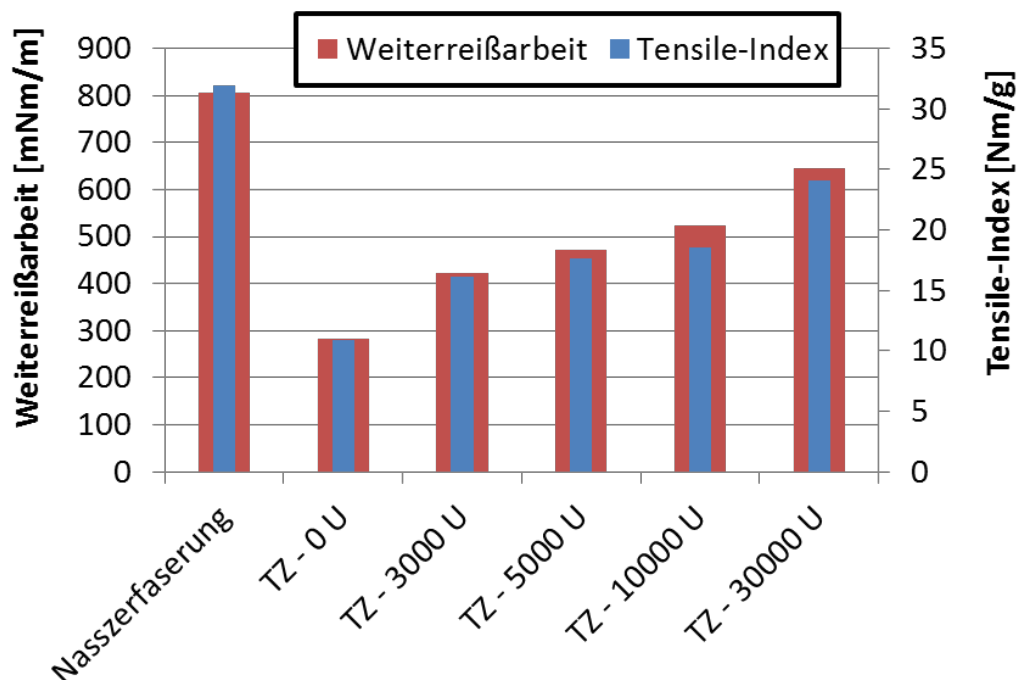


Abbildung 9: Festigkeitsentwicklung durch zunehmende Desintegrationsbehandlung

Dafür wurde der trockenzerfaserte Stoff (Zeitungsdruck, luto, zerfaserter bei 55 Hz) nachträglich im Desintegrator behandelt – und dies bei 3.000, 5.000, 10.000 und 30.000 Umdrehungen (bei jeweils 3.000 Umdrehungen die Minute). Diese „Mahlkurve“ wurde mit dem nur gequollenen trockenzerfaserten Stoff (TZ – 0 U) sowie dem konventionell im Desintegrator erzeugten Fasserstoff (Nasszerfaserung) verglichen. Die konventionelle Desintegration des mechanisch vorzerkleinerten Zeitungsdruckpapiers erfolgte bei 30.000 Umdrehungen – also für die Dauer von 10 Minuten.

Wie die Abbildung 9 zeigt, können mit fortlaufender Desintegration beträchtliche Festigkeitssteigerungen von weit über 100 % erzielt werden, wobei sich die dynamischen und die statischen Festigkeiten annähernd identisch entwickeln. Trotz dieser Verbesserungen liegen die Festigkeiten weiterhin deutlich hinter denen der konventionellen Nassbehandlung zurück. Grund hierfür sind die schon angesprochenen Faserschädigungen sowie eine Feinstoffzunahme. Diese Feinstoffe, wie Mikroskopaufnahmen zeigten, wirken mitunter wie Störstoffe auf den Faseroberflächen und blockieren somit potenzielle Faser-Faser-Bindungen. Weiterhin kann sich bei der Blattbildung des trockenzerfaserten Stoffes das Fasernetzwerk nicht in dem Maße ausbilden und komprimieren, wie bei der Nassbehandlung. Als Beleg sei hierfür die Dickenentwicklung der Laborblätter genannt.

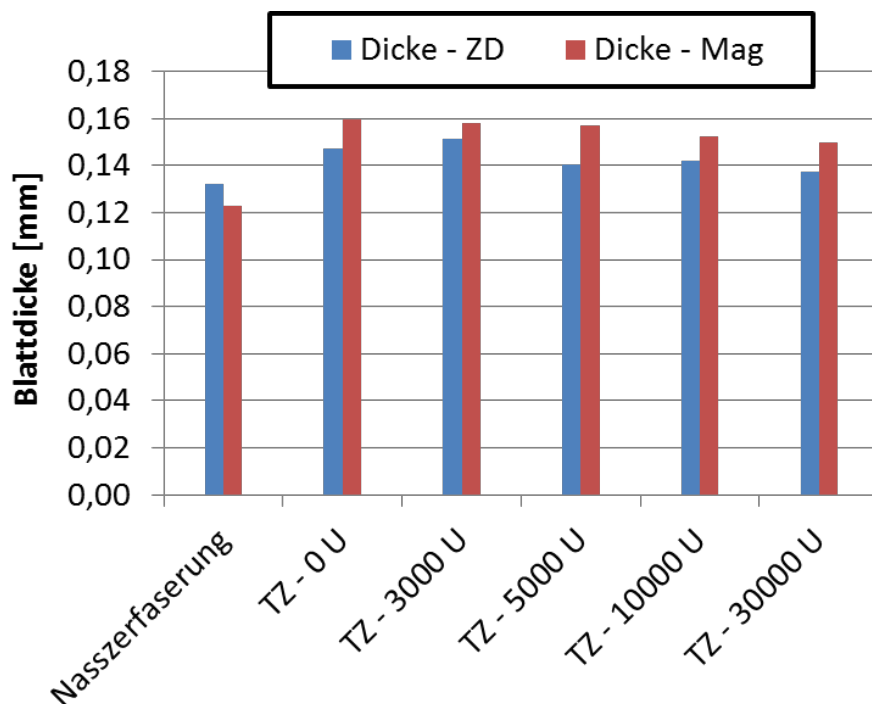


Abbildung 10: Dickenentwicklung der Laborblätter durch zunehmende Desintegration

Insbesondere beim Magazinpapier, wie die Abbildung 10 zeigt, erreicht der trockenzerfaserte Stoff auch mit zunehmender Desintegrationszeit nicht annähernd die Dicke einer konventionellen Nasszerfaserung – und damit auch nicht deren Festigkeiten.

Nachdem trotz der zuvor beschriebenen Diskrepanzen eine ausreichende Faserstoffqualität mittels Trockenzerfaserung erzeugt werden konnte, wurde der Faserstoff mit Hilfe von Luftstrahlsieben und Siebkaskaden sortiert. Hauptziel dabei – sowie des gesamten Teilprojekts – war es, einen Deinking-Effekt durch den Austrag von Druckpartikeln mit der Aschefraktion zu generieren.

Wie bereits erwähnt, wurden insgesamt die besten Resultate bei einer Motordrehfrequenz von 55 Hz erzielt. Weitere Verbesserungen konnten zudem durch eine Befeuchtung des Altpapiers auf ca. 30 % Feuchtegehalt erreicht werden. Anscheinend führt ein erhöhter Feuchtegehalt im Papier zu einer schonenderen Zerfaserung, was sich – zumindest in den meisten Fällen – in verbesserten Fasereigenschaften und somit auch erhöhten Festigkeiten widerspiegelt. Auch die optischen Eigenschaften lassen sich auf diese Weise verbessern, wie aus Abbildung 11 ersichtlich wird.

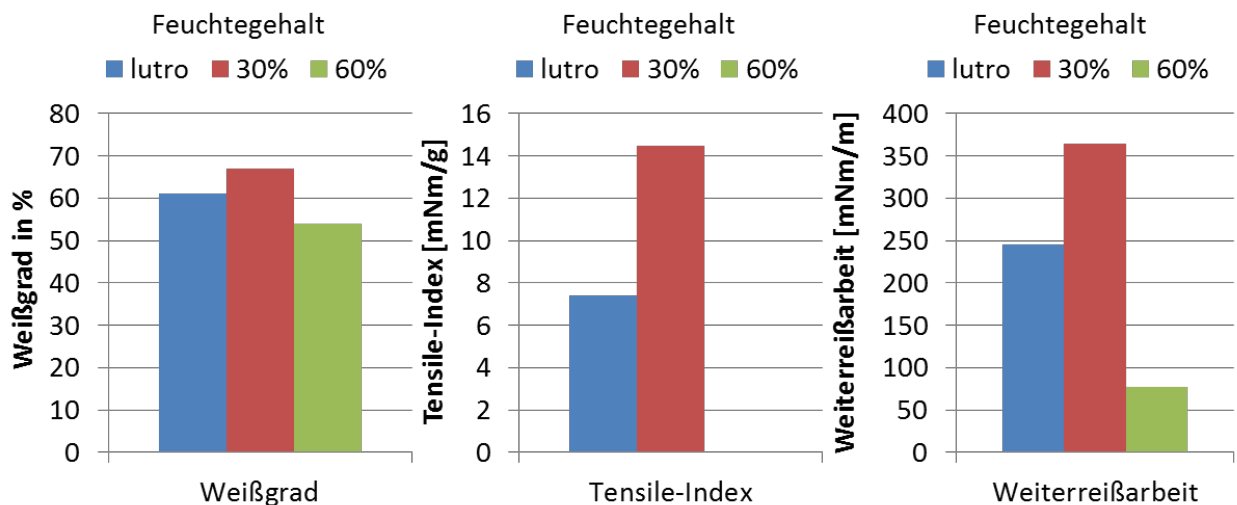


Abbildung 11: Blatteigenschaften in Abhängigkeit des Feuchtegehalts bei der Trockenzerfaserung bei 55 Hz Motordrehfrequenz (für Magazinpapier dargestellt)

Eine weitere Wasserzufuhr auf ca. 60 % Feuchtegehalt brachte hingegen eine mitunter deutliche Verschlechterung der relevanten Eigenschaften mit sich. Manche Eigenschaften, wie zum Beispiel der Tensile-Index, konnten aufgrund der geringen Blattfestigkeiten bei einer Eingangsfeuchte von ca. 60 % gar nicht erst gemessen werden.

Warum die Befeuchtung auf 30 % zunächst eine Verbesserung darstellt und eine weitere Wasserzufuhr auf 60 % Feuchtegehalt dann zu einer signifikanten Verschlechterung führt, soll im Folgenden näher erläutert werden.

Gründe für die in Abbildung 11 dargestellten Verbesserungen sind vor allem höhere Faserlängen und reduzierte Feinstoffanteile, die aus der schonenderen Zerkleinerung bei 30 % Feuchtegehalt resultieren. Anscheinend können die Fasern durch die Befeuchtung weitaus intakter aus dem Fasernetzwerk herausgelöst werden, während die Trockenzerk­leinerung des luftgetrockneten Altpapiers zu Faser­kürzungen sowie Schädigungen der Faser­oberfläche führt (Fibrillen werden abgerissen und der Feinstoffanteil steigt).

Der drastische Festigkeitseinbruch durch eine weitere Wasserzufuhr kann an dieser Stelle jedoch nicht gänzlich aufgeklärt werden – gerade im Hinblick auf die nur geringfügig abweichenden Fasereigenschaften bei 30 % und 60 % Feuchtegehalt (Abbildung 12). Möglicherweise führt die simultane Trocknung im Aggregat zu einer Versprödung der Faser oder einer sonstigen Schädigung infolge der erhöhten Trocknungsleistung des Aggregats.

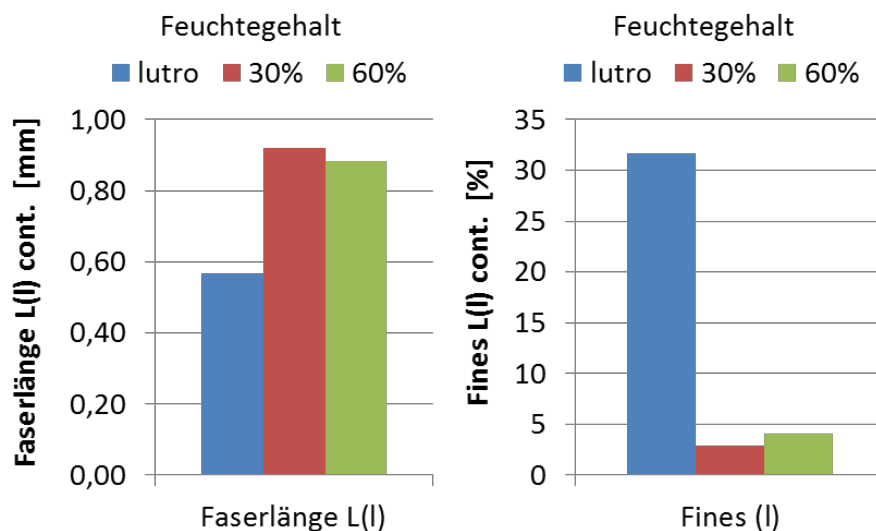


Abbildung 12: Fasereigenschaften in Abhängigkeit des Feuchtegehalts bei der Trockenzerk­leinerung bei 55 Hz Motordrehfrequenz (für Magazinpapier dargestellt)

Zur Erinnerung: Das verwendete Aggregat kann simultan zur Zerkleinerung durch Aufheizen des Luftförderstroms eine Trocknung des feuchten Aufgabeguts durchführen. Dies bedeutet, dass trotz der unterschiedlichen Eingangsfeuchte die Altpapiere am Ausgang nahezu den gleichen Trockengehalt aufweisen, was durch unterschiedliche Lufttemperaturen (Trocknungsenergien) erreicht wird.

Nicht zuletzt führt eine Erhöhung des Feuchtegehalts auf 60 % zu einer deutlich sichtbaren Vergrauung des Faserstoffs und somit zu einer nicht unerheblichen Abnahme des Weißgrads. Dies hängt vermutlich ebenfalls mit der Erhöhung der Trocknungsenergie zusammen.

Im Folgenden soll der Deinking-Effekt durch Sortierung des trockenzerfaserten Altpapiers mit Hilfe einer Siebkaskade erörtert werden. Da die besten Resultate bei einer Motordrehfrequenz von 55 Hz und einer Papiereingangsfeuchte von 30 % erzielt wurden, beziehen sich die nachfolgenden Diagramme auf diese Einstellungen. Zudem werden die Ergebnisse überwiegend für das Magazinpapier dargestellt, da die Strichschicht im Vergleich zum Zeitungsdruckpapier, bei dem sich die Druckfarben weitestgehend auf der Faseroberfläche befinden, eine wesentlich bessere Ascheabtrennung begünstigt.

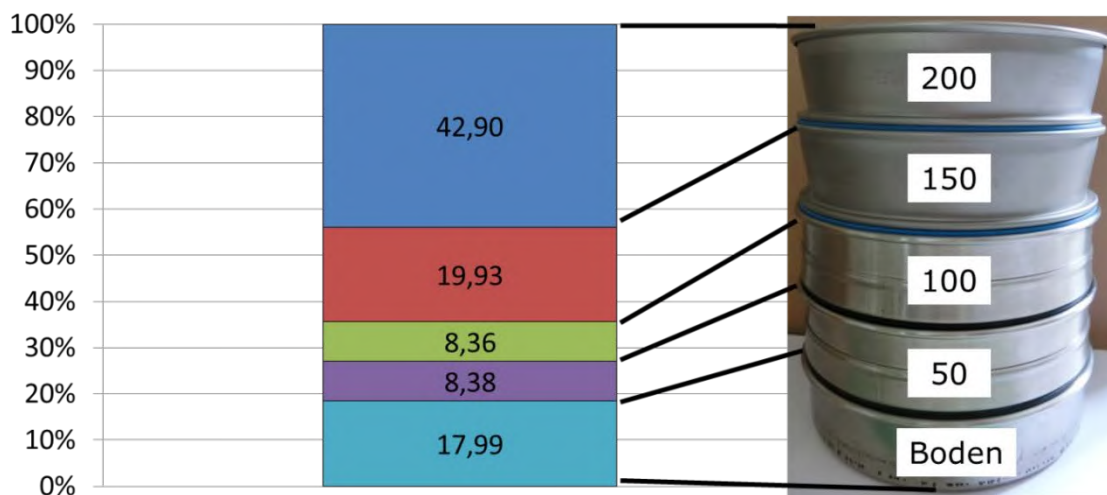


Abbildung 13: Prozentuale Massenverteilung des Faserstoffs nach der Siebkaskade (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)

Abbildung 13 zeigt die Massenverteilung einer Fraktionierung mit der Siebkaskade für das Magazinpapier. Über 60 % des Faserstoffs verteilen sich demnach auf die beiden größten Siebweiten von >200 µm und >150 µm. Den drittgrößten Anteil nimmt allerdings die kleinste Fraktion von <50 µm ein (Boden), wobei es sich hierbei größtenteils um Asche handeln sollte. Eine Faserlängenanalyse sowie Veraschung der fünf Fraktionen soll Aufschluss darüber geben.

Wie erwartet und aus Abbildung 14 ersichtlich, akkumuliert sich die Langfaserfraktion vorwiegend in den ersten beiden Siebklassen – und hier insbesondere im Bereich >200 µm. Bereits in der dritten Fraktion weist die Faserlänge nicht einmal mehr 50 % des Wertes der

größten Siebklasse auf (Kurzfaserfraktion). Die unteren Fraktionen sind aufgrund des hohen Asche- und Feinstoffgehalts nicht messbar gewesen. Für das Zeitungsdruckpapier zeigte sich eine ähnliche Entwicklung der Faserlänge.

Darüber hinaus verdeutlicht die Abbildung 14, dass eine Fraktionierung zu einer Verbesserung der Fasereigenschaften beiträgt. So resultiert aus der größten Siebfraktion eine Faserlänge die oberhalb der konventionellen Nasszerfaserung liegt. Vor allem gegenüber dem nichtklassierten trockenzerfaserten Stoff, bei dem sich die Faserlänge deutlich unterhalb der Nasszerfaserung befindet, wird durch die Siebung eine beachtliche Steigerung der Faserlänge erreicht.

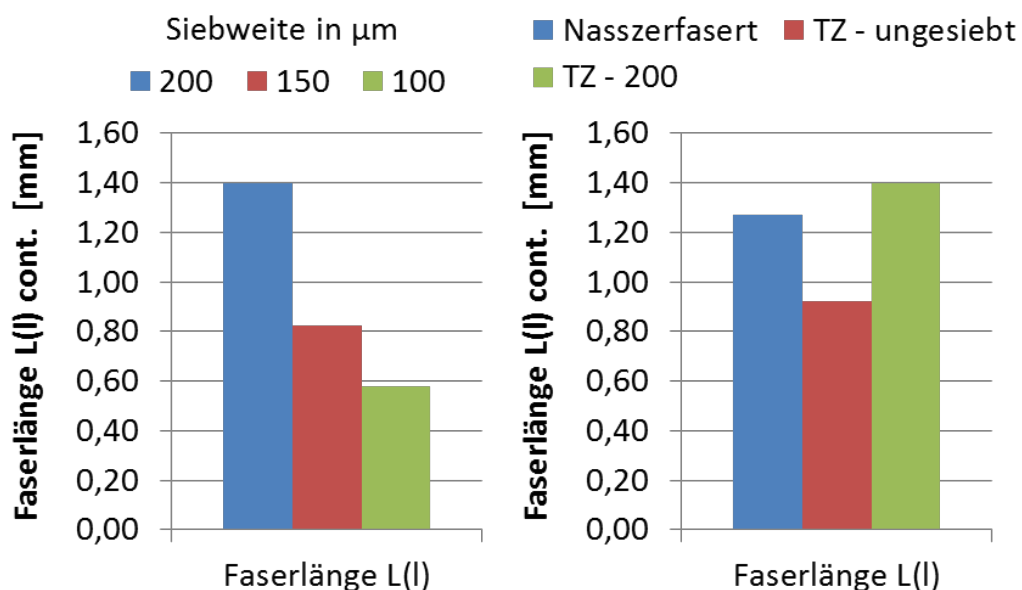


Abbildung 14: Faserlängenentwicklung durch Siebkaskade (links) und Vergleich der Faserlänge mit dem nichtgesiebten sowie nasszerfaserten Stoff (rechts) (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)

Dass sich durch die Siebkaskade der Aschegehalt des Ausgangsstoffs vorwiegend in die beiden kleinsten Fraktionen verlagert, wird aus der nachfolgenden Abbildung 15 deutlich.

Da einige Füllstoffe bereits durch die Vorzerkleinerung verloren gehen (Stauben) und anschließend auch teilweise im Trockenzerfaserungsaggregat verbleiben, sinkt der Aschegehalt gegenüber dem nasszerfaserten Ausgangsstoff (AS) signifikant. Für das Resultat der Siebkaskade ist allerdings nur der Vergleich der fünf Fraktionen mit dem nichtgesiebten, trockenzerfaserten Stoff (TZ) entscheidend.

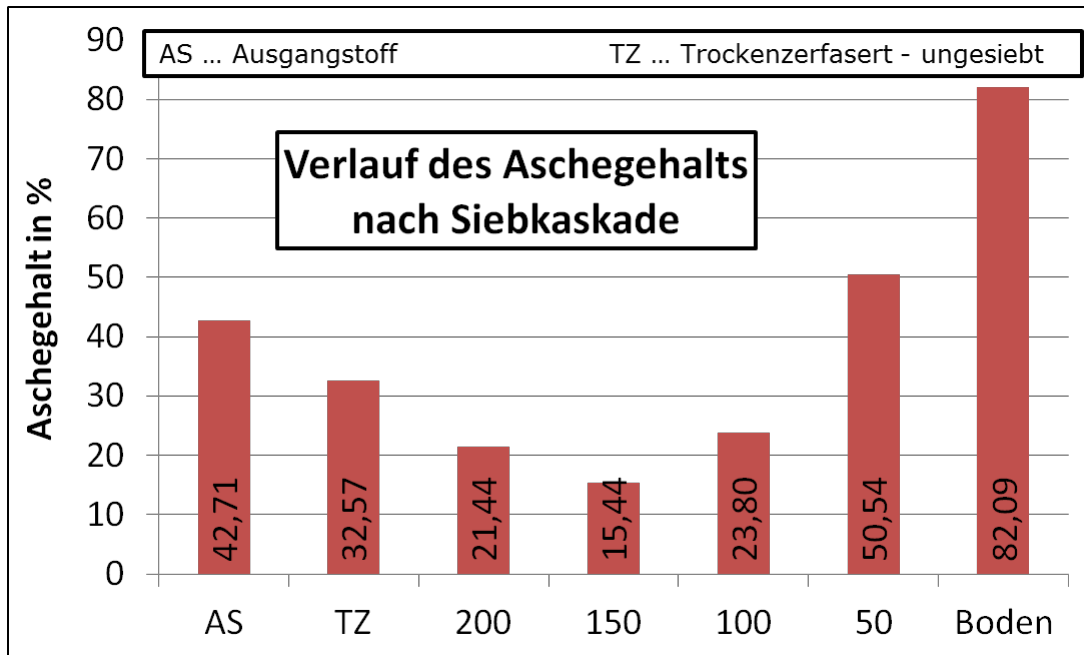


Abbildung 15: Verlauf des Aschegehalts (Glührückstand bei 525 °C) nach Siebkaskade (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)

Für die oberen drei Fraktionen (200, 150 und 100 µm) wird deutlich, dass vermehrt Füllstoffe und andere Aschepartikel ausgetragen werden und sich die Fasern dort akkumulieren. Dementsprechend sinkt der Glührückstand deutlich unter dem Niveau des nichtgesiebten, trockenzerfaserten Stoffs. Der Hauptaschanteil hingegen verlagert sich in die unteren beiden Fraktionen (50 µm und <50 µm (Boden)). Dies zeigt sich anhand des dort extrem hohen Aschegehalts von 50 % bzw. 82 %.

Dementsprechend kann festgehalten werden, dass ein Ascheaustrag durch Trockensiebung möglich ist, wobei dies insbesondere für Magazinpapiere gilt. Für Zeitungspapiere sind die Ergebnisse aufgrund des geringeren Füllstoffgehalts und der fehlenden Strichschicht weniger prägnant.

Anhand der Ausprüfung der optischen Eigenschaften kann nun festgestellt werden, ob durch den Ascheaustrag auch vermehrt Druckpartikel entfernt werden können. Für diesen Zweck wurde der Weißgrad der erzeugten Siebfraktionen mit dem des nichtgesiebten Ausgangsfaserstoffes verglichen.

Aufgrund des generell geringeren Ascheanteils zeigte sich für das Zeitungsdruckpapier kein signifikanter Deinking-Effekt durch die Trockensiebung. Der Hauptgrund hierfür ist, dass die

Prallmühle nur unzureichend in der Lage ist, die auf den Fasern anhaftenden Druckpartikel abzutrennen.

Im Gegensatz dazu wird durch die Trockensiebung ein deutlicher Weißgradgewinn für das Magazinpapier erzielt. Bei diesem Druckprodukt haften die Druckpartikel nicht direkt auf der Faser Oberfläche, sondern auf der Streichfarbe, welche eine Schicht zwischen Papier und Druckfarbe bildet. Diese Strichschicht wird inklusive den daran anhaftenden Farbpigmenten durch die Trockenzerfaserung abgetrennt, zerkleinert und im Anschluss durch die Trockensiebung ausgetragen, wodurch ein signifikanter Deinking-Effekt realisiert wird.

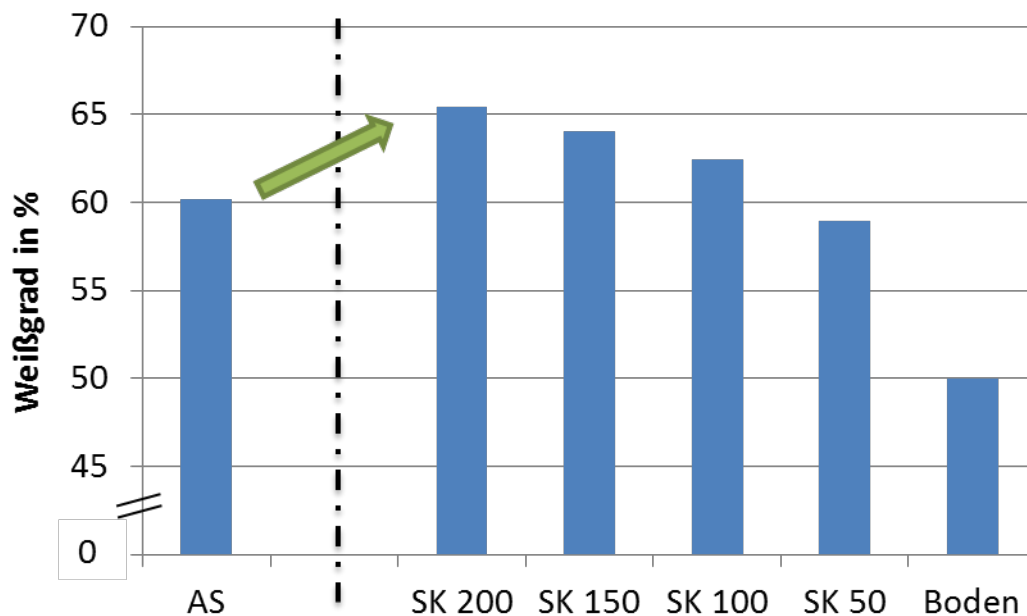


Abbildung 16: Weißgradsteigerung durch Ascheaustrag mittels Siebkaskade im Vergleich zum nichtgesiebten Ausgangsstoff (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)

Wie die Abbildung 16 verdeutlicht, korreliert der Weißgrad beim Magazinpapier nahezu umgekehrt proportional zum Ascheaustrag in Abbildung 15. Dies bedeutet, dass die anorganischen Bestandteile inklusive der Druckfarben sukzessive in die Bodenfraktion der Siebkaskade gelangen, sich dort akkumulieren und folglich zu einem hohen Glührückstand beziehungsweise zu einem niedrigen Weißgrad führen. Dementsprechend verbleiben nur wenige Druckpartikel in den oberen Siebfraktionen, was hier zu geringen Aschegehalten und damit auch hohen Weißgraden führt. Im Vergleich zur nichtgesiebten Referenz kann auf diese Weise ein signifikanter Weißgradgewinn von über 5%-Punkten generiert werden.

Auch die Betrachtung der Schmutzpunkte in den jeweiligen Fraktionen unterstreicht den Deinking-Effekt durch die Trockensiebung. Aufgrund der geringen Siebmengen konnten jedoch keine Laborblätter für die DOMAS-Analyse gebildet werden, wodurch nur eine Betrachtung der Schmutzpunkte mit dem Mikroskop möglich war.

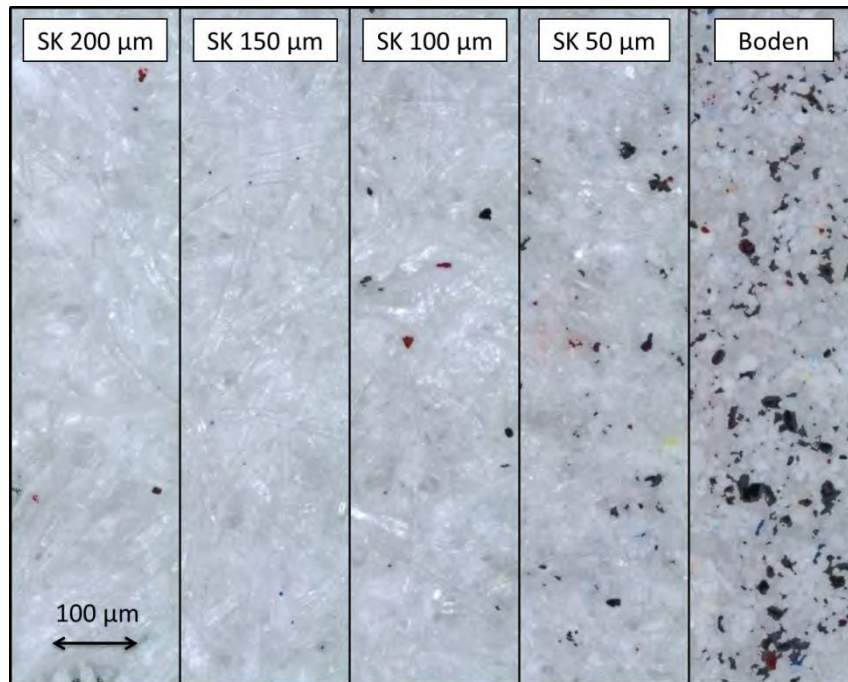


Abbildung 17: Mikroskopaufnahmen der einzelnen Fraktionen der Siebkaskade (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)

Auch ohne eine analytische Auswertung der Mikroskopaufnahmen in Abbildung 17 wird deutlich, dass sich die Schmutzpunkte, unter anderem Druckpartikel, vorwiegend in den beiden kleinsten Fraktionen akkumuliert haben. Insbesondere in den Fraktionen $>200\ \mu\text{m}$ sowie $>150\ \mu\text{m}$ konnte die Anzahl der Schmutzpunkte drastisch reduziert und somit der Weißgrad signifikant erhöht werden.

Vergleichbare Mikroskopaufnahmen beim Zeitungsdruckpapier geben Aufschluss darüber, warum die Trockensiebung dort nicht zu dem gewünschten Druckfarbenaustrag führt.

Wie die Abbildung 18 zeigt, akkumulieren sich die Schmutzpunkte nicht wie beim Magazinpapier in den unteren Siebfraktionen, sondern verteilen sich relativ gleichmäßig auf alle Größenklassen. Wie bereits erwähnt, scheint die Trockenzerfaserung die direkt auf den Fasern gebundenen Druckpartikel nicht ablösen zu können, wodurch diese mit Hilfe der

Trockensiebung auch nicht ausgetragen werden können. Zumindest trifft dies für einen Großteil der Druckpartikel zu.

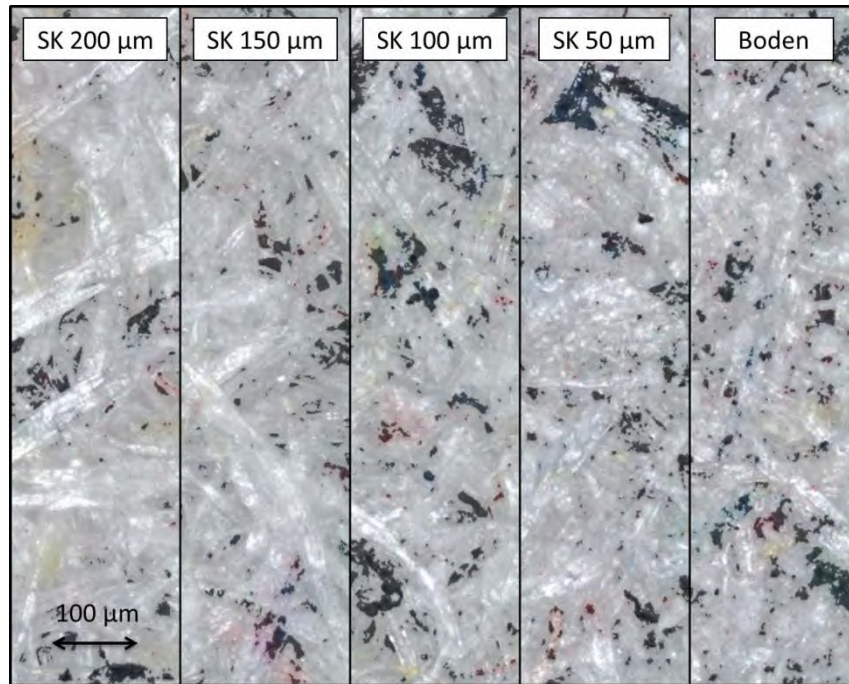


Abbildung 18: Vergleich der Mikroskopaufnahmen für das Zeitungsdruckpapier

Allgemein gilt jedoch, dass die Trockenzerkleinerung zu einer Reduzierung der Schmutzpunktfäche führt.

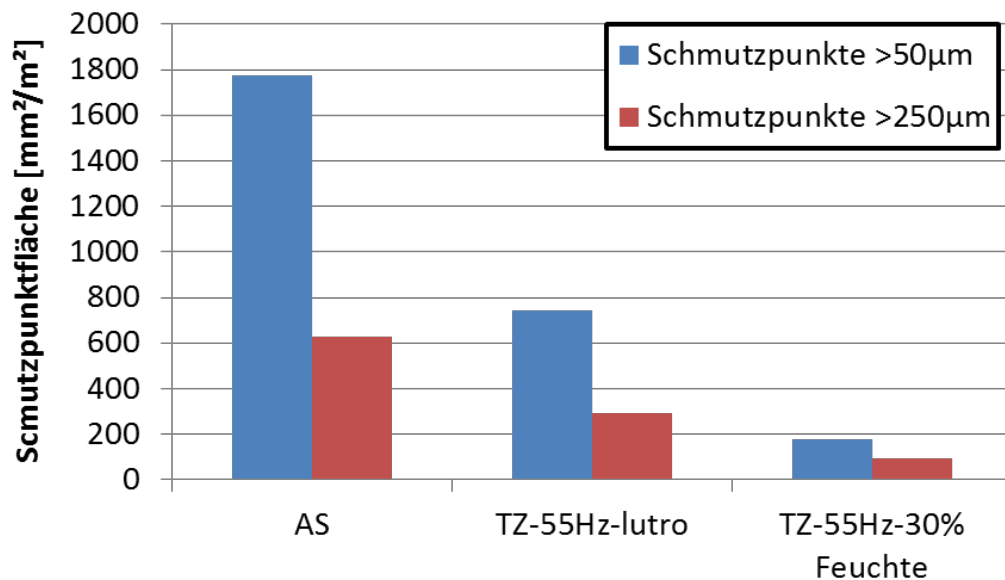


Abbildung 19: Reduzierung der Schmutzpunktfäche durch die Trockenzerkleinerung (dargestellt für Magazinpapier, Motordrehfrequenz von 55 Hz)

Wie die Abbildung 19 verdeutlicht, kommt es im Vergleich zum konventionell behandelten Ausgangsstoff für die Größenklassen $>50\ \mu\text{m}$ und $>250\ \mu\text{m}$ zu mehr als einer Halbierung der Schmutzpunktfäche. Anscheinend führen – zumindest beim Magazinpapier – die mechanischen Belastungen und Luftwirbel innerhalb der Prallmühle zu einer Auflösung der Strichschicht und den daran haftenden Druckfarbenagglomeraten.

Darüber hinaus zeigt sich auch bei Betrachtung der Schmutzpunkte, dass eine Befeuchtung des Faserstoffs zu einer weiteren Verbesserung führt. Auch eine weitere Wasserzugabe auf 60 % Feuchtegehalt so wie eine Erhöhung der Motordrehfrequenz auf 60 Hz führen zu einer fortschreitenden Reduzierung der Schmutzpunktfäche – allerdings auch zu der schon erwähnten Verschlechterung der Fasereigenschaften. Da beim Zeitungsdruckpapier die Druckpartikel nur im geringen Maße von der Faseroberfläche abgelöst werden, sind hier die Effekte weit weniger ausgeprägt – insbesondere im Vergleich zum Ausgangsstoff.

Für die Luftstrahlsiebung – dem zweiten Klassierverfahren – sind die erzielten Ergebnisse tendenziell ähnlich, allerdings nicht mit denen der Siebkaskade vergleichbar. Während beim Luftstrahlsieb eine starke Saugkraft die Klassierung unterstützt, findet bei der Siebkaskade lediglich eine Rüttlung des Klassierguts statt, welche zudem mit Siebhilfen (Kunststoffwürfel) verstärkt wird.

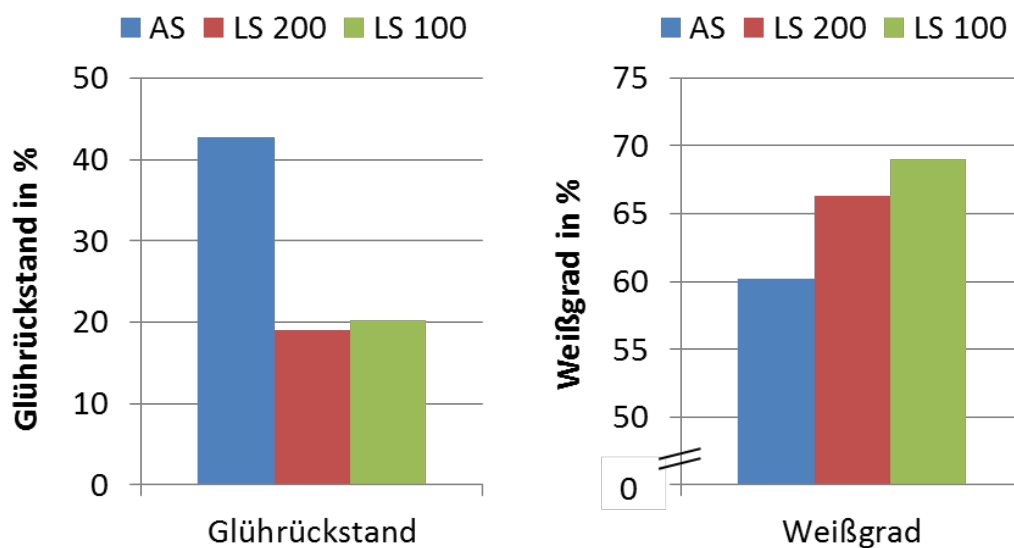


Abbildung 20: Weißgradsteigerung durch Ascheaustag mittels Luftstrahlsiebe

Dementsprechend konnte durch Verwendung eines Luftstrahlsiebes ein höherer Weißgradgewinn erzeugt werden, da durch die anliegende Saugkraft auch die in der

Faserstoffwolle eingeklemmten Druckpartikel effizient abgetrennt werden können. Darüber hinaus können mit dem Luftstrahlsieb weitaus größere Faserstoffmengen in einem kürzeren Zeitintervall weiterverarbeitet werden.

Dementsprechend war es im Gegensatz zur Siebkaskade möglich, eine ausreichende Faserstoffmenge für die Blattbildung bereitzustellen. Damit konnten die schon angesprochenen Verbesserungen der Faserstoffeigenschaften anhand von Blattfestigkeitsmessungen analytisch nachgewiesen werden.

Wie bei der Siebkaskade kommt es durch Abtrennung der Füllstofffraktion, in der sich auch die Druckpartikel befinden, zu einer drastischen Absenkung des Glührückstands, wodurch ein deutlicher Weißgradanstieg erzielt wird. Durch die anliegende Saugkraft fällt der Weißgradgewinn mit fast 9%-Punkten deutlicher aus als bei der Siebkaskade.

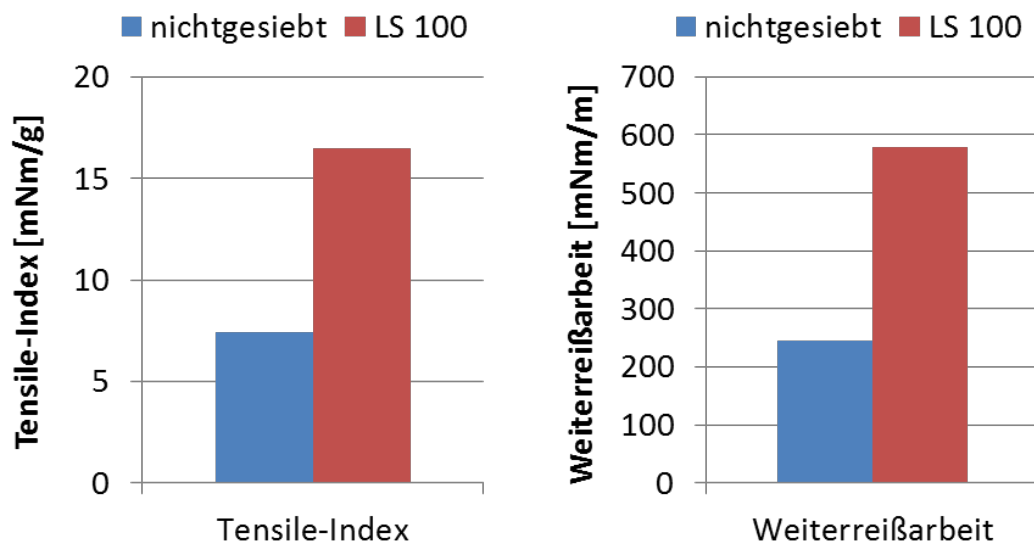


Abbildung 21: Festigkeitsanstieg durch Austrag der Feinstoff- und Aschefraktion mit Hilfe der Luftstrahlsiebung

Indem darüber hinaus auch ein Großteil der Kurzfaser- und Feinstofffraktion abgetrennt wird und somit überwiegend die Langfaserfraktion zurückbleibt, führt die Trockensiebung im Vergleich zur nichtgesiebten Referenz auch noch zu einer deutlichen Verbesserung der Blatteigenschaften.

Abschließend fasst die nachfolgende Abbildung noch einmal den Deinking-Effekt durch die verschiedenen Siebverfahren zusammen.

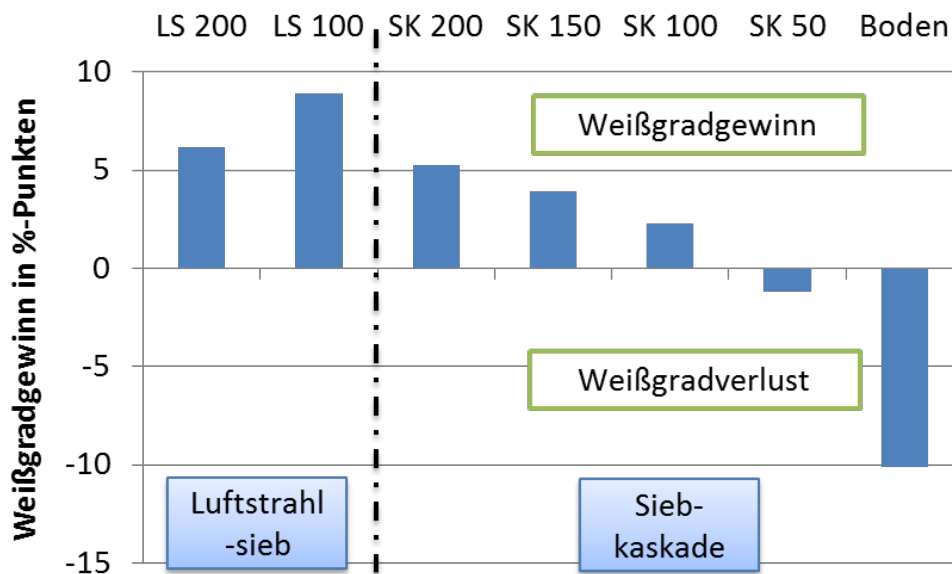


Abbildung 22: Weißgradgewinn/-verlust durch die verschiedenen Trockensiebverfahren gegenüber dem nichtgesiebten Ausgangsstoff (dargestellt für Magazinpapier, 55 Hz, 30 % Feuchte)

Nicht unerwähnt soll an dieser Stelle der benötigte Energieeinsatz für die Trockenzerfaserung bleiben, da neben den Qualitätsmerkmalen vor allem die Betriebskosten für eine großtechnische Umsetzung von Bedeutung sind.

Da bei den Versuchen vor allem die Faserstoffqualität und weniger die Quantität im Vordergrund stand (orientierende Versuche zur allgemeinen Machbarkeit), waren die beobachteten spezifischen Energieeinsätze zwischen 800–2000 kWh/t viel zu hoch, um überhaupt eine mögliche Implementierung in die Praxis in Betracht zu ziehen. Belastbare Upscale-Kriterien für das verwendete Aggregat – mit einer installierten Leistung von 55 kW – ergaben allerdings einen deutlich geringeren spezifischen Energieeinsatz von 25–75 kWh/t.

Eine Steigerung des Durchsatzes durch Verwendung einer größeren Baureihe sowie eine Optimierung des in keiner Weise für die Papiertechnik ausgelegten Aggregats sollten jedoch zu einer weiteren Reduzierung des spezifischen Energieeinsatzes beitragen. Anzumerken ist auch, dass der Stofftransport, welcher beim verwendeten Aggregat durch einen von Ventilatoren erzeugten Luftstrom erfolgt, nicht unerheblich zum Gesamtenergiebedarf des TurboRotors beiträgt. Die Verwendung von schwerkraftbasierten Prallmühlen könnte demnach eine energetisch deutlich günstigere Alternative darstellen.

Erwähnt werden sollte auch, dass eine Befeuchtung des Altpapiers zu einer sukzessiven Abnahme des Energieeinsatzes führt. Allerdings muss im Gegenzug noch zusätzlich die Energie zum Aufheizen des Luftstroms für die parallele Trocknung mit einberechnet werden.

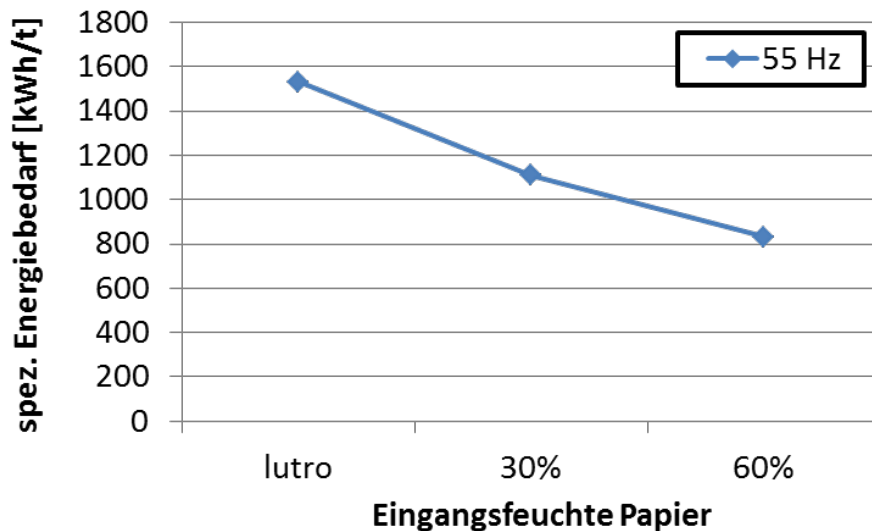


Abbildung 23: Energiebedarf der Trockenzerfaserung in Abhängigkeit der Eingangsfeuchte des Altpapiers(dargestellt für Magazinpapier)

Für die Siebung mittels Siebkaskade und Luftstrahlsieb können aufgrund der verwendeten Laborgeräte keine Aussagen für den Energiebedarf – insbesondere im großtechnischen Maßstab – getroffen werden. Jedoch sollte die Druckfarbenentfernung durch eine Trockensiebung deutlich energieeffizienter als mit Hilfe einer Flotation erfolgen.

3.4 Zusammenfassung

Es zeigte sich, dass mit Hilfe einer Prallmühle eine Zerlegung des Fasergefüges ohne Wasserzugabe möglich ist. Auch konnte durch die Verwendung von Luftstrahlsieben und Siebkaskaden ein Ascheaustrag erzielt werden. Dabei kam es im Vergleich zu einer nichtgesiebten Probe zu einer Reduzierung der Schmutzpunktfläche und einer Steigerung des Weißgrads. Das Niveau der Flotation konnte allerdings nicht erreicht werden.

Hinsichtlich der Druckfarbenentfernung wurden die besseren Ergebnisse für das Magazinpapier erzielt, da die Trockenzerfaserung nur unzureichend in der Lage war, die auf den Fasern anhaftenden Druckpartikel abzulösen, so dass diese nicht trocken abgetrennt werden konnten. Insgesamt jedoch konnten die Teilziele des Projekts erreicht werden.

4 Dispergierung durch Adsorptionsdeinking

4.1 Einleitung

4.1.1 Hintergrund

Mit dem Adsorptionsdeinking hat die TU Dresden ein neues Konzept für ein energieeffizienteres Deinking-Verfahren vorgestellt. Im Gegensatz zum etablierten aber auch energieintensiven Flotationsprozess, in dem kleine Luftbläschen als Druckfarbensammler dienen, verwendet das neue Verfahren kleine Polymergranulate auf dessen Oberfläche die abgelösten Druckfarbenpartikel absorbieren – sofern geeignete Bedingungen vorherrschen. Die Energieeinsparungen ergeben sich aus der Tatsache, dass dieser Prozess im Vergleich zur Flotation bei sehr viel höheren Stoffdichten durchgeführt werden kann und damit der Energieaufwand für den Transport großer Wassermengen entfällt.

Noch höhere Energieeinsparungen ergeben sich durch die Integration des Adsorptionsprozesses in den Teilprozess der Zerfaserung, welcher seit langem bei ebenfalls hohen Stoffdichten durchgeführt wird. In diesem Fall würden durch die Relativbewegung zwischen den Polymergranulaten und dem Faserstoff mechanische und damit auch dispergierende Beanspruchungen ausgeübt werden, ähnlich denen die in Kugelmøhlen wirken. Dies würde nicht nur den Zerfaserungsprozess, sondern auch gleichzeitig die Ablösung der Druckfarben von den Fasern sowie deren Zerkleinerung unterstützen, was letztlich sowohl die Flotation als auch die Adsorption erleichtert.

Eine solche Druckfarbenzerkleinerung wird für gewöhnlich erst durch Dispergieren oder Kneten bei hohen Stoffdichten erreicht – den energieintensivsten Teilprozess in der Altpapierstoffaufbereitung. Grundsätzlich könnte das Adsorptionsdeinking es also erlauben, die drei Teilprozesse Zerfaserung, Deinking und Dispergierung bei prinzipiell gleicher Stoffdichte in nur einem Prozessschritt umzusetzen. Eine derartige Kombination von Verfahrensschritten – soweit technisch und wirtschaftlich machbar – würde zweifelslos einen großen Fortschritt in der Stoffaufbereitung bedeuten – wenn nicht sogar einen wirklichen Durchbruch.

Die bisherigen Untersuchungen zum Adsorptionsdeinking konzentrierten sich vorwiegend auf die Eignung von polymeren Granulaten, Druckfarbenpartikel an ihre Oberfläche zu adsorbieren und somit den Faserstoff simultan zur Zerfaserung zu deinken. Abweichend davon sollen in diesem Projekt ausschließlich die Dispergiereigenschaften der verwendeten

Polymergranulate und anderer Adsorbentien, welche als Dispergiergranulat zum Einsatz kommen, eruiert werden.

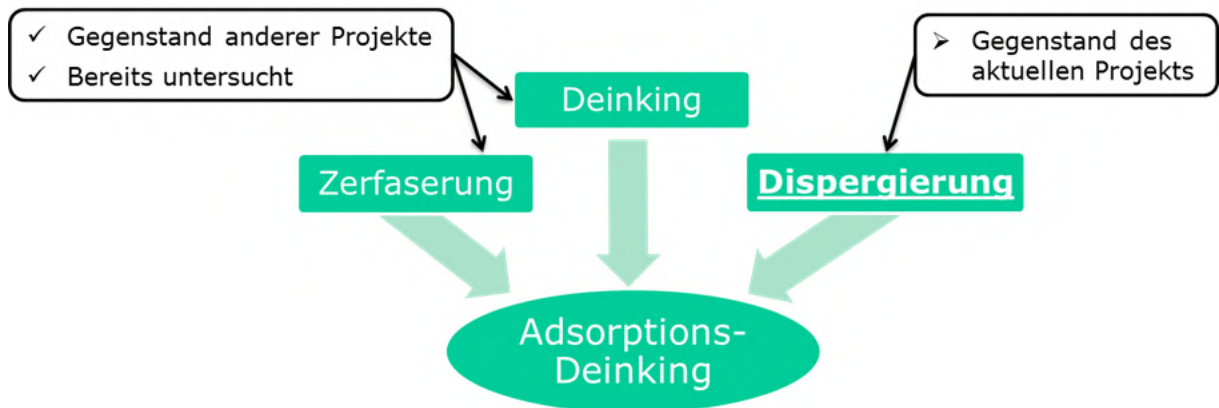


Abbildung 24: Mögliche Kombination von Teilprozessen durch das Adsorptionsdeinking

Die Dispergiereigenschaften der Adsorbentien, also die Fähigkeit, Druckfarbenpartikel von der Faser abzulösen, zu zerkleinern und zu vergleichmäßigen, sollten vor allem durch die Form und Größe sowie den mechanischen Eigenschaften wie der Dichte und der Härte bestimmt sein. Nicht zuletzt ist auch die Menge der eingesetzten Granulate entscheidend.

Um zuverlässige Aussagen über den Dispergiereffekt verschiedener Adsorbentien zu tätigen, sollen verschiedene Kombinationen aus Druckprodukt und Adsorbentien untersucht werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass nicht gleichzeitig auch Druckfarbenpartikel aus dem System entfernt werden dürfen – eine Randbedingung die dem Adsorptionsdeinking zwar entgegen läuft, aber für Versuchszwecke erfüllt werden soll. Ein Druckfarbenaustrag würde nämlich die Resultate unnötig verfälschen und eine abschließende Bewertung des Dispergiereffekts nicht zulassen (*siehe Problematik unter: 4.2 Voruntersuchungen*). Dementsprechend sollen die verwendeten Adsorbentien, wie bereits erwähnt, ausschließlich als Dispergiergranulat eingesetzt werden.

4.1.2 Konventionelle Dispergierung

Dort, wo besonders hohe Qualitätsansprüche an den deinkten Faserstoff gestellt werden, wird die Flotation meist zweistufig durchgeführt, wobei zwischen den beiden Stufen eine Dispergierstufe geschaltet ist. Die heute am häufigsten eingesetzten Aggregate für die

Dispergierung sind Scheibendisperger und sogenannte Knetter. Dabei erfolgt unter Aufwendung von zusätzlicher mechanischer Energie eine weiterführende Ablösung sowie Zerkleinerung von Druckfarben und anderen Verunreinigungen. Insgesamt werden durch das Dispergieren die nachfolgenden Ziele angestrebt / (1)/:

- Ablösung von noch an Fasern oder Strichpigmenten haftenden Druckfarben.
- Zerkleinerung der Druckfarben (und anderer Verunreinigungen), um
 - eine Verringerung der Partikelgröße unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze von 50 µm zu erzielen, bzw.
 - sie in ein für die Flotation geeignetes Größenspektrum zu überführen und austragen zu können.
- Zerkleinerung und Vergleichmäßigung von Stickys (klebende Verunreinigungen).
- Entwicklung des Festigkeitspotenzials der Faser.
- Einmischung von Chemikalien (z. B. für Bleiche).

Disperger haben also nicht (mehr) die Aufgabe Verunreinigungen zu entfernen, sondern deren Austrag in der nachfolgenden Flotation vorzubereiten bzw. die aus den Verunreinigungen resultierenden optischen Störgrößen (Schmutzpunkte) zu minimieren.

Um die nötigen Scher- und Reibungskräfte zu erzeugen, arbeiten Disperger bei hohen Stoffdichten, die weit oberhalb der der Flotation oder der Zerfaserung liegen. Dementsprechend müssen aus der Faserstoffsuspension vorab große Wassermengen entfernt werden. Für eine effektivere Dispergierung wird der Faserstoff zudem auf fast 100°C erwärmt. All dies führt dazu, dass die Dispergierung mit einem sehr hohen Energieverbrauch einhergeht und den energieintensivsten Teilprozess der Stoffaufbereitung noch vor der Druckfarbenentfernung darstellt.

4.2 Voruntersuchungen

In Voruntersuchungen wurden verschiedene Polymergranulate ausgewählt und hinsichtlich ihrer dispergierenden Wirkung untersucht. Zudem wurden unterschiedliche Druckprodukte für die Versuche ausgewählt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Auswahl.

Tabelle 1: Auswahl an Druckprodukten und Dispergiergranulaten (Polymere)

Druckprodukt		Adsorbentien (Polymergranulate)			
Trägerpapier	Druckverfahren	PP	PA 6.6	PET	PE
ZD	Offset-Coldset	✓	✓	✓	✓
SC	Tiefdruck	✓	✓	✓	✓
LWC	Offset-Heatset	✓	✓	✓	✓
LWC	Tiefdruck	✓	✓	✓	✓

Weitere Informationen zu den verwendeten Polymergranulaten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Diese Polymergranulate wurden bereits mehr oder weniger erfolgreich für die Druckfarbenanlagerung eingesetzt. Für die aktuellen Versuche sollen jedoch ausschließlich die Dispergiereigenschaften der ausgewählten Polymere bewertet werden.

Tabelle 2: Abkürzungen und Eigenschaften der verwendeten Polymere

	Polymer	Abk.	Form	Härte	Dichte in g/cm ³	Verfügbarkeit/ Kosten
1.	Nylon	PA 6.6	zylindrisch	hart	1,13	gering/hoch
2.	Polyethylen	PE	kugelförmig	weich	0,91...0,94	hoch/gering
3.	Polyethylen- terephthalat	PET	zylindrisch	hart	1,36	hoch/gering
5.	Polypropylen	PP	kugelförmig	weich	0,9...0,915	hoch/gering

In allen Versuchen konnte im Vergleich zu einer undeinkten Referenzprobe eine deutliche Verringerung der Schmutzpunktfläche nachgewiesen werden. Da durch das Adsorptionsdeinking Druckpartikel aus dem System entfernt werden – also eine Schwärzung der Polymergranulate erfolgt –, fällt es jedoch grundsätzlich schwer die dispergierende Wirkung qualitativ und quantitativ zu bewerten. Hinzu kommt, dass die Analyse von kleinen Schmutzpunkten an der Professur für Papiertechnik nicht unterhalb von 50 µm möglich ist. Dementsprechend liegen nur Indizien für einen erfolgten Dispergiereffekt vor. Dies gilt insbesondere für den Größenbereich unterhalb von 50 µm.

Trotzdem konnte für im Offset-Heatset- sowie im Tiefdruckverfahren bedrucktes LWC-Papier ein Dispergiereffekt zweifelsfrei festgestellt werden (Abbildung 25).

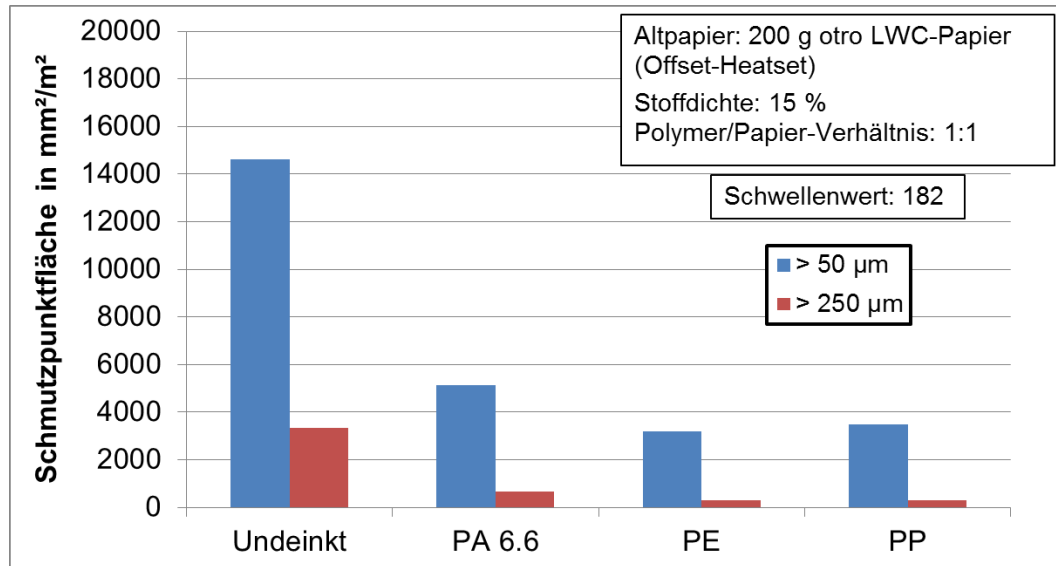


Abbildung 25: Reduzierung der Schmutzpunktfäche durch Adsorptionsdeinking

Im Vergleich zu den anderen Druckprodukten konnten nämlich keine Druckfarbenpartikel an die Polymeroberfläche angelagert werden. Dennoch konnte die Schmutzpunktfäche deutlich reduziert werden und das obwohl kein Weißgradgewinn erzielt werden konnte – also kein Druckfarbenaustrag stattfand. Anschließend durchgeführte Mikroskopaufnahmen – im Vergleich zu einer undeinkten Referenzprobe – bestätigen die Messwerte der DOMAS-Bildanalyse (Abbildung 26). Demzufolge kann die deutliche Abnahme der Schmutzpunktfäche auf eine Polymer/Faserstoff-Reibung zurückgeführt werden. Diese Reduzierung wird also nicht durch einen Druckfarbenaustrag, sondern durch die dispergierende Wirkung von Polymergranulaten herbeigeführt.

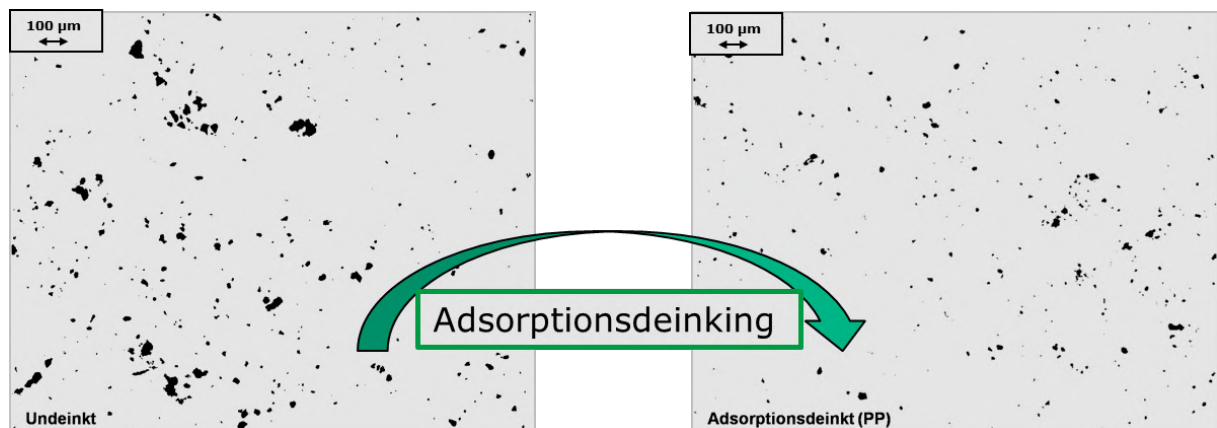


Abbildung 26: Undeinkte (links) und adsorptionsdeinkte (rechts) Mikroskopaufnahmen eines Laborblattes aus LWC-Papier mit Offset-Heatset bedruckt (50-fache Vergrößerung)

Für eine bessere Darstellung der Druckfarbenpartikel wurden die Mikroskopaufnahmen einer Schwellenwertanalyse unterzogen und somit der Kontrast der Schmutzpunkte erhöht. Noch deutlicher wird der Dispergiereffekt bei einer 200-fachen Vergrößerung (Abbildung 27). Hierbei wird auch ersichtlich, dass ein großer Teil der Druckpartikel unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze von 50 µm zerkleinert wurde.

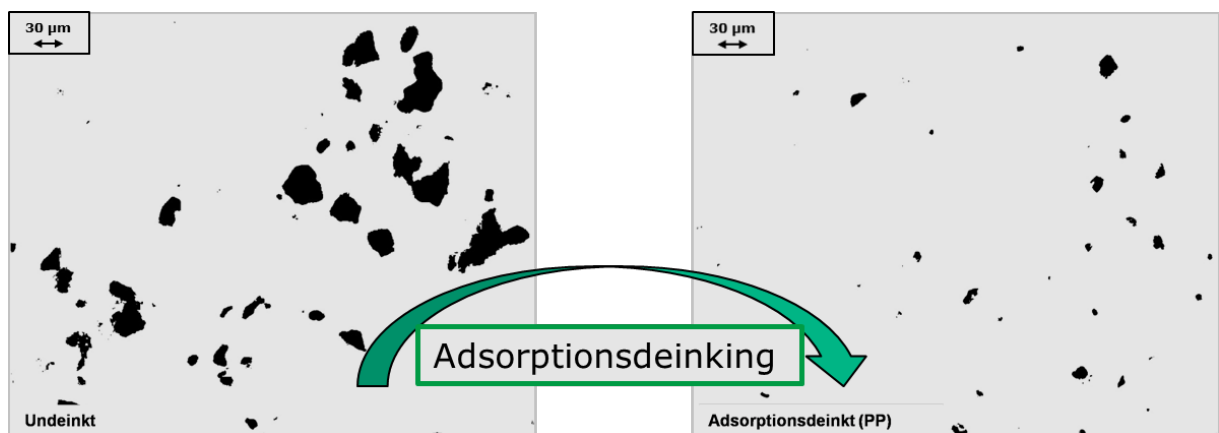


Abbildung 27: Undeinkte (links) und adsorptionsdeinkte (rechts) Mikroskopaufnahmen eines Laborblattes aus LWC-Papier mit Offset-Heatset bedruckt (200-fache Vergrößerung)

Aus den Ergebnissen der Vorversuche können folgende Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen abgeleitet werden:

Für eine quantitative und qualitative Bewertung des Dispergiereffekts ergibt sich die Forderung, neben der DOMAS-Messung auch solche Analysemethoden zu wählen, die eine Betrachtung unterhalb von 50 µm erlauben. Dies gilt insbesondere für Altpapier, welches vorwiegend aus Zeitungsdruck- und Magazinpapieren besteht.

Für weiterführende Untersuchungen ist zudem entscheidend, dass durch die gewählte Kombination aus Druckprodukt und Dispergiergranulat beim Adsorptionsdeinking keine Druckpartikel aus dem System entfernt werden. Darüber hinaus ist es notwendig, den erzielten Dispergiereffekt mit dem Stand der Technik, also einem Knetzer oder Disperger, zu vergleichen.

Um festzustellen, ob eine Druckfarbenablösung bzw. eine Rückanlagerung bereits abgelöster Druckfarbenpartikel an die Faseroberfläche erfolgt, wird nach den Versuchen eine Hyperwäsche durchgeführt. Zudem wird der Faserstoff flotiert.

4.3 Hauptversuch

4.3.1 Einleitung

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen haben gezeigt, dass für den Nachweis des Dispergiereffekts eine Analyse der Schmutzpunkte auch unterhalb von 50 µm erfolgen muss. Darüber hinaus müssen als Referenzversuch die unbehandelten Proben in einem konventionellen Disperger behandelt werden. Für die weiteren Versuche ist jedoch am wichtigsten, dass die verwendeten Granulate keine Druckfarbenpartikel an ihre Oberfläche anlagern, weil entfernte bzw. ausgetragene Druckfarbenpartikel die Bewertung des Dispergiereffekts erschweren. Idealerweise kommen unregelmäßig geformte und feste Granulate zum Einsatz, deren Oberflächeneigenschaften – auch in Verbindung mit Chemikalien – keinerlei Affinitäten zur Druckfarbe aufweisen. Die Druckfarbenmenge im System soll also konstant bleiben, lediglich die Partikelgröße der Druckfarbe soll verändert werden.

Als Dispergiergranulat sollen neben den bekannten Polymeren auch andere, nicht-polymere Stoffe auf ihre Eignung hin untersucht werden. Grundsätzlich kommen dafür alle Feststoffe in Frage, die die Eignung als Druckfarbenadsorbens erfüllen und den Ansprüchen der Rezyklierbarkeit (Reinigung und Wiederverwendung) genügen. Die Möglichkeit der Beschichtung von Feststoffen mit Polymeren bzw. der Einlagerung von Feststoffen in Polymeren eröffnet hierbei zahlreiche Möglichkeiten. Somit können – zumindest perspektivisch – gezielt die Adsorptionseigenschaften durch das Polymer und die Dispergiereigenschaften durch den Feststoff optimiert werden.

Zunächst jedoch sollen grundlegende Einflussfaktoren wie Form, Größe, Dichte und Härte durch Auswahl verschiedener Dispergiergranulate eruiert werden. Neben den mengenmäßig bedeutendsten Druckprodukten Zeitungsdruck- und Magazinpapier sollen auch für die Dispergierung kritische Druckprodukte untersucht werden.

4.3.2 Verwendete Begriffe, Definitionen und Abkürzungen

Nicht-dispergierter Stoff (Referenz A) (ND)

Konventionell dispergierter Stoff (Referenz B) (KD)

Alternativ dispergierter Stoff (AD)

4.3.3 Versuchsplan und Durchführung

Zur Einordnung der alternativen Dispergierung wurden zwei Referenzversuche durchgeführt (siehe Versuchsplan in Abbildung 28). Dabei wurde das Altpapier einerseits entsprechend der INGEDE-Methode 11p konventionell in einem Labor-Pulper zerfasert (Referenz A). Zum anderen wurde das Altpapier nach der Zerfaserung in einem Technikumsdisperger nach dem Stand der Technik dispergiert (Referenz B).

Für die alternative Dispergierung hingegen wurden dem Labor-Pulper zusätzlich polymere Granulate oder andere, nicht polymere Dispergiergranulate hinzugefügt. Darüber hinaus wurden keine weiteren Veränderungen gegenüber der Zerfaserung nach der INGEDE-Methode 11p vorgenommen.

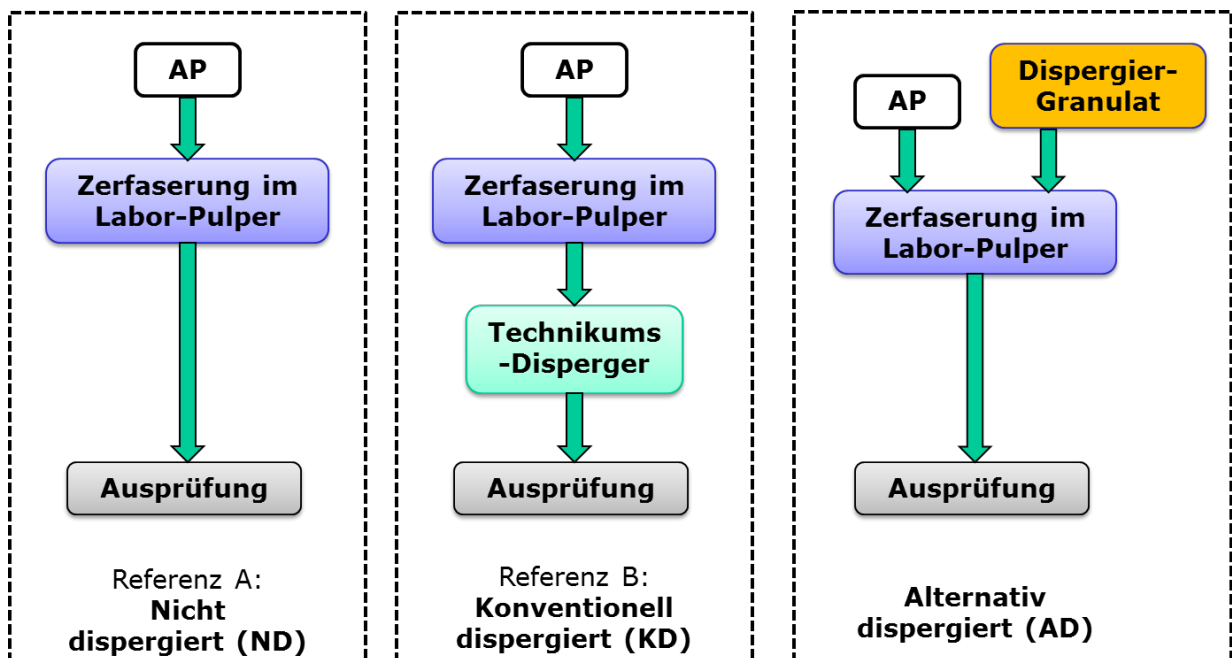


Abbildung 28: Versuchsplan zur alternativen Dispergierung durch Adsorptionsdeinking im Vergleich zur konventionellen Dispergierung und Zerfaserung

Um Verfälschungen oder anderen negativen Effekten vorzubeugen, werden alle Versuchspunkte im gleichen Labor-Pulper unter identischen Randbedingungen behandelt.

- Zerfaserungsdauer: 20 Minuten
- Temperatur: 45 °C
- Stoffdichte: 15 %
- Chemie- und Verdünnungswasserzugabe nach INGEDE-Methode 11p

Abweichend zur Vorschrift soll die Stoffdichte in ausgewählten Versuchen variiert werden.

Für die Bestimmung der Referenz B wird der zerfaserte Faserstoff vor der Behandlung im Technikumsdisperger in einer Zentrifuge eingedickt. Die Stoffdichte steigt dabei von 15 % auf ungefähr 30 %.

Nach der Zerfaserung bzw. der Dispergierung im Technikumsdisperger wurden Laborblätter von 1,35 g (DOMAS) und 2,4 g (Weißgrad, Festigkeiten) gebildet. Zudem wurde der Faserstoff entsprechend den angewandten Vorschriften gewaschen (INGEDE-Methode 5).

Insgesamt wurden die Versuche für drei verschiedene Druckprodukte durchgeführt:

- ZD Zeitungsdruckpapier
- Mag Magazinpapier
- UV-Druck UV-gehärtete Druckfarben

Das Adsorptionsdeinking (alternative Dispergierung) erfolgte mit folgenden Granulaten:

- PP Polypropylen
- PA 6.6 Polyamid (Nylon)
- PET Polyethylenterephthalat
- EVA Ethylenvinylacetat
- CaCO₃ Calciumcarbonat

4.3.4 Analysemethoden

Die Auswertung der Schmutzpunkte (Dispergiereffekt) sowie der Faser-, Suspensions- und Blatteigenschaften erfolgte anhand der folgenden Messungen:

- FiberLab
- Entwässerungswiderstand nach Schopper-Riegler E (SR)
- Wasserrückhaltevermögen (WRV)
- Schmutzpunktanalyse DOMAS
- Elrephro
 - Weißgrad
- Tensile Index und Weiterreißarbeit (Brecht-Imset)

4.3.5 Prüfnormen und Vorschriften

Entsprechende Abweichungen wurden an entsprechender Stelle genannt.

Eigenschaft	Norm/Vorschrift
Durchführung	
Assessment of Print Product Recyclability - Deinkability Test -	INGEDE-Methode 11p
Test Sheet Preparation of Pulps and Filtrates from Deinking Processes	INGEDE-Methode 1
Measurement of Optical Characteristics of Pulps and Filtrates from Deinking Processes	INGEDE-Methode 2
Bewertung der Druckfarbenablösung durch Hyperwäsche mit dem Haindl-McNett-Fraktionator	INGEDE-Methode 5
Faserstoff/Suspension	
Entwässerungswiderstand	DIN 5267-1, 10/00
FiberLab	FiberLab/PTS-Methode für Verteilungsanalyse
pH-Wert	DIN 53124
Sonstige	
Stoffdichte	DIN EN ISO 4119, 05/96
Blattbildung	ISO 5269-2, 03/05
Trockengehalt	DIN EN ISO 638, 01/09
Feuchtegehalt	DIN EN 20287, 09/94
Blattprüfung	
Probenvorbehandlung	DIN EN ISO 20187, 11/93
Normklima	DIN 50014
Flächenbezogene Masse	DIN EN ISO 536:, 08/96
Dicke	DIN EN ISO 534, 05/05
Glührückstand 525 °C	DIN 54370: 2007
Tensile-Index	DIN EN ISO 1924-2: 2009-05
Weiterreißarbeit (Brecht-Imset)	DIN 53115
Optische Eigenschaften	
Schmutzpunktanalyse DOMAS	TAPPI-Norm T 213 OM-89, INGEDE-Methode 2
Kleine Schmutzpunktmessung (KSM)	PTS-Methode
ERIC 700 nm	ISO 22754, TAPPI T567, PAPTAC E.8
Reflexionsfaktor (Weißgrad)	DIN 53145-1, 03/00

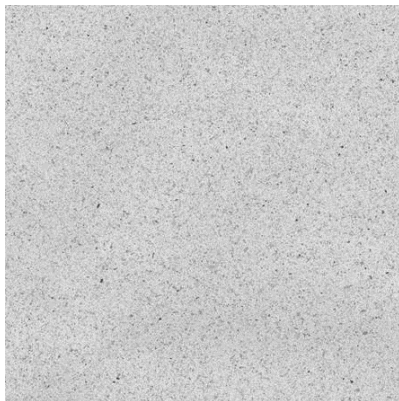
4.4 Ergebnisse und Auswertung

4.4.1 Orientierender Vorversuch

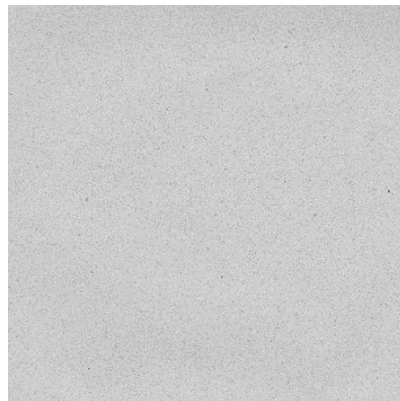
In einem orientierenden Vorversuch wurde die Dispergierung von UV-gehärteten Druckprodukten durch das Adsorptionsdeinking untersucht. Als Ausgangsmaterial kam eine Mischung des genannten Druckprodukts zum Einsatz:

- 50 % holzhaltiges (hh), ungestrichenes SC-Papier von SCA
- 25 % holzfreies (hf), gestrichenes Papier von UPM
- 25 % holzhaltiges (hh), gestrichenes LWC-Papier von Stora Enso

Die aufgelisteten Muster wurden alle mit der gleichen UV-gehärteten Druckfarbe bedruckt. Je Versuchspunkt wurden insgesamt 200 g (otro) verwendet. Die Zerfaserung nach INGEDE-Methode 11p erfolgte bei 15 % Stoffdichte im Labor-Pulper – zum einen ohne Dispergiergranulat und zum andern mit 250 g Polypropylen (PP) als Dispergiergranulat. Abbildung 29 zeigt die gebildeten Laborblätter.



Zerfaserung im Labor-Pulper
ohne Dispergier-Granulat



Zerfaserung im Labor-Pulper
mit Dispergier-Granulat

Abbildung 29: Eingescannte Bilder der Laborblätter

Die Abbildung unterstreicht deutlich sichtbar die von dem Polymergranulat ausgehende Dispergierung – also die Zerkleinerung der Schmutzpunkte. Eine Verfälschung des Dispergiereffekts durch den Austrag von Druckpartikeln fand nicht statt.

Die Messung der Schmutzpunktfläche mit der DOMAS-Bildanalyse unterstreicht den subjektiven Eindruck der Laborblätter (Abbildung 30).

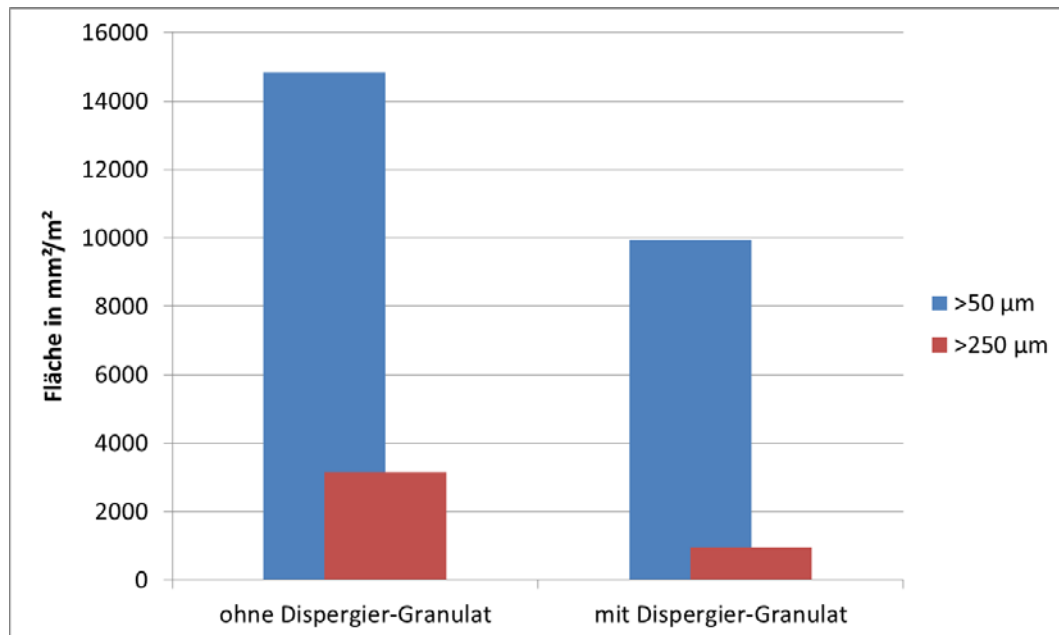


Abbildung 30: Vergleichende Darstellung der Schmutzpunktfäche (>50 µm + >250 µm)

Die nachfolgende Abbildung 31 zeigt die Unterteilung der Schmutzpunktfäche für die verschiedenen Größenklassen. Eine Messung der Schmutzpunkte unterhalb von 50 µm ist mit dem DOMAS-System nicht möglich.

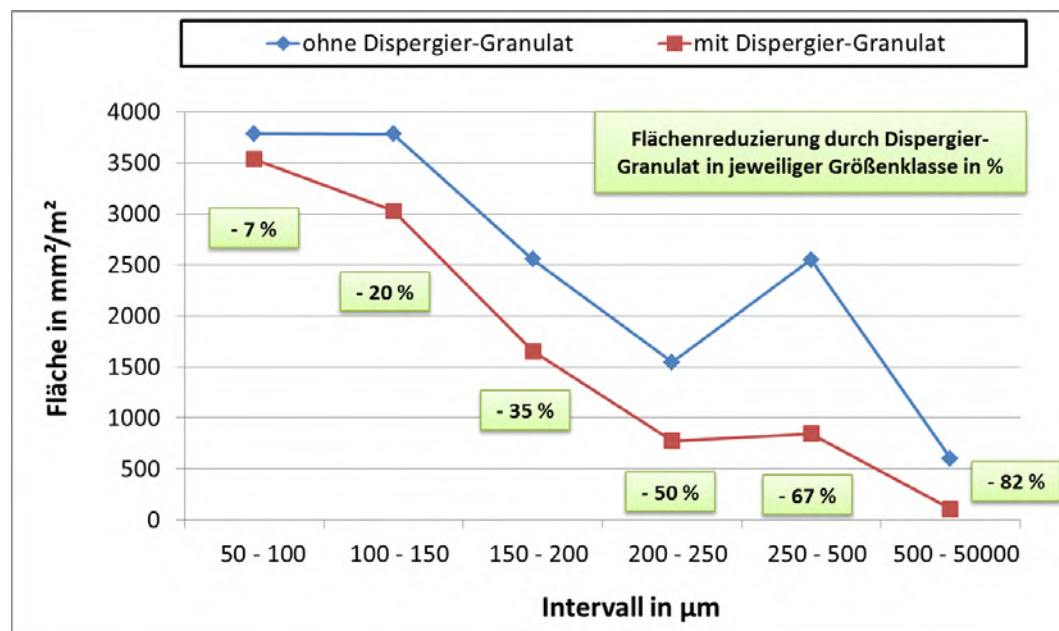


Abbildung 31: Vergleichende Darstellung der Schmutzpunktfäche in Intervallform

Es wird ersichtlich, dass insbesondere für den Bereich großer Schmutzpunkte (>150 µm) eine deutliche Zerkleinerung der Druckpartikel erzielt wird.

Weiterhin konnte ein für die Dispergierung typischer Weißgradabfall nachgewiesen werden. Zudem wurde eine Reduzierung der Schmutzpunktzahl gemessen. Allerdings kam es insgesamt vermutlich zu einem Anstieg der Schmutzpunktzahl durch eine Zerkleinerung der Schmutzpunkte unterhalb der nicht messbaren Grenze von 50 µm und somit zu einer Verschiebung unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze – einem Teilziel der Dispergierung.

Abbildung 32 fasst die wichtigsten Erkenntnisse der Voruntersuchungen zusammen.

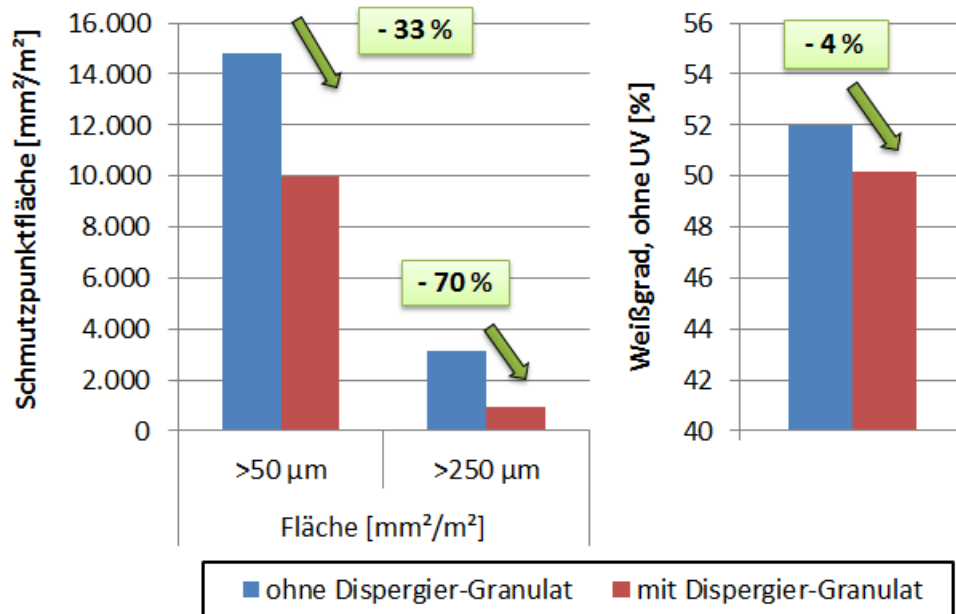


Abbildung 32: Schmutzpunktanalyse und Weißgradentwicklung des Vorversuchs

Abschließend wurde in diesem orientierenden Vorversuch der Granulattyp gewechselt. Anstelle von Polypropylen kam Polyamid (Nylon) zum Einsatz.

Während das Polypropylen-Granulat eine runde Form, eine weiche Oberfläche sowie eine geringe Dichte aufweist, kennzeichnet sich Polyamid durch eine zylindrisch, eckige Form, eine härtere Oberfläche sowie eine höhere Dichte. Zudem verfügt Polyamid bei gleicher Einsatzmenge über eine etwas größere Oberfläche (ca. 25 %), mit der die Druckfarbenpartikel in Wechselwirkung treten können.

Durch diesen Granulatwechsel zeigte sich, dass nochmals eine Reduzierung der Schmutzpunktfläche gegenüber der unbehandelten Referenz erzielt werden konnte. Insgesamt belief sich die Verbesserung für alle Größenklassen zusammen (>50 µm) auf fast 50 % (Vergleich PP: 33 %), für den Bereich der großen Schmutzpunkte (>250 µm) auf über 80 % (Vergleich PP: 70 %).

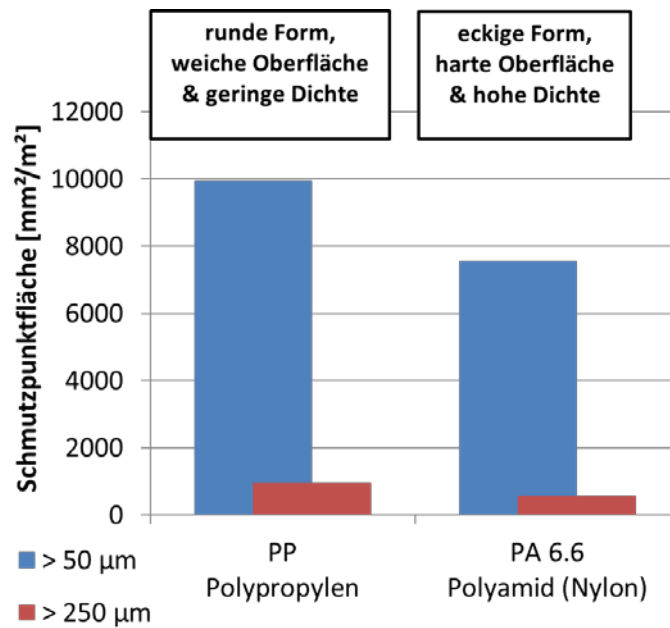


Abbildung 33: Verbesserung der Dispergiereigenschaften (weitere Reduzierung der Schmutzpunktfäche) durch Wechsel des Granulattyps

Im Hauptversuch soll der nachgewiesene und überaus vielversprechende Dispergiereffekt mit dem Stand der Technik verglichen werden. Darüber hinaus sollen die wesentlichen Einflussfaktoren der alternativen Dispergierung in geeigneten Versuchen eruiert werden.

4.4.2 Hauptversuch

Eine erste Versuchsreihe mit dem UV-gehärteten Druckprodukt, bei dem Polypropylen als Dispergiergranulat zum Einsatz kam, sollte eine allgemeine Einordnung des alternativen Dispergiervfahrens im Vergleich zum Technikumsdisperger ermöglichen. Die Granulatmenge belief sich dabei auf 250 Gramm (bei 200 Gramm Altpapier) und im Gegensatz zum orientierenden Vorversuch wurden die drei verschiedenen UV-Drucke in allen Hauptversuchen zu jeweils gleichen Teilen gemischt.

Die Ergebnisse in Abbildung 34 zeigen, dass beide Dispergiervfahren (KD + AD) eine deutliche Reduzierung der Schmutzpunktfäche gegenüber der unbehandelten Referenz (ND) bewirken und somit durchaus miteinander vergleichbar sind. Auch wenn das Niveau der konventionellen Dispergierung nicht ganz erreicht wird, sind die ersten Resultate des Hauptversuchs äußerst vielversprechend, zumal die alternative Dispergierung – im Gegensatz zur konventionellen – einiges an Optimierungspotenzial verspricht. Zudem erfolgt

die alternative Dispergierung in nur einem Prozessschritt – und damit bei einem deutlich geringeren Energieeinsatz.

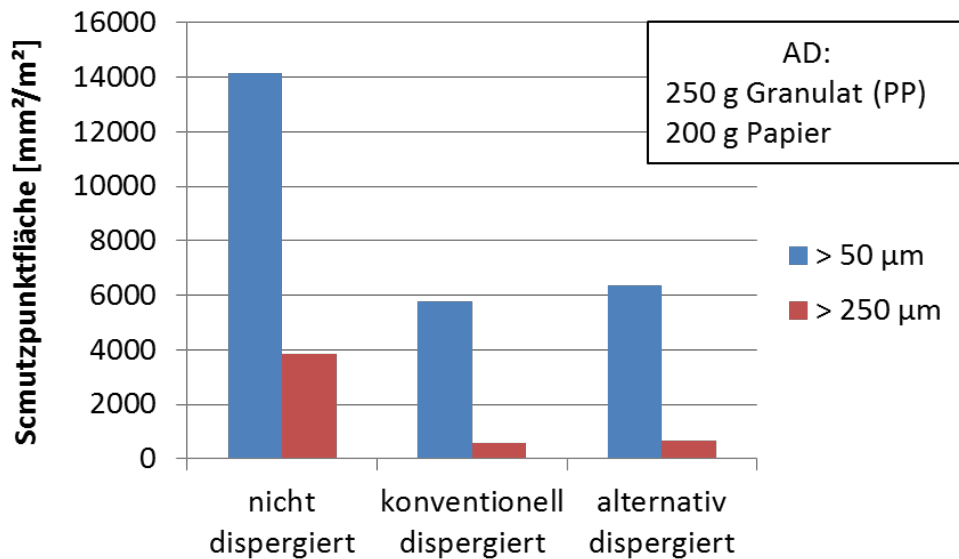


Abbildung 34: Einordnung der alternativen Dispergierung durch Vergleich der Schmutzpunktfäche (> 50 µm und > 250 µm) mit den Referenzpunkten

Wie die Darstellung der Schmutzpunktfäche in den jeweiligen Größenklassen noch einmal unterstreicht, sind die Unterschiede zwischen den beiden Dispergierv Verfahren verschwindend gering. Dies trifft insbesondere für den Bereich der großen und damit besonders kritischen Schmutzpunkte zu, da die Kurvenverläufe nahezu deckungsgleich sind.

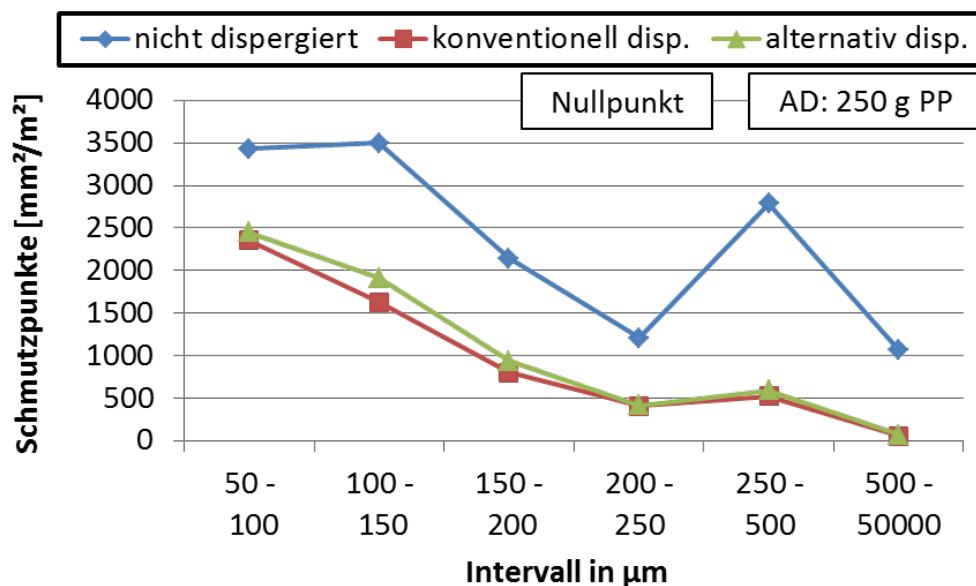


Abbildung 35: Einordnung der alternativen Dispergierung durch Vergleich der Schmutzpunktfäche (für alle Größenklassen) mit den Referenzpunkten

An dieser Stelle sei noch darauf hingewiesen, dass eine konventionelle Dispergierung für gewöhnlich erst nach der ersten Flotationsstufe erfolgt. Da die alternative Dispergierung jedoch bereits simultan zur Zerkleinerung stattfindet, muss zum Zwecke eines aussagekräftigen Vergleichs die konventionelle Dispergierung im Technikumsdisperger direkt nach der Zerkleinerung erfolgen – also noch vor der Flotation. Zwischen Zerkleinerung und Dispergierung wird lediglich noch eine Eindickung des Faserstoffs durchgeführt.

Da die Dispergierung nicht nur die Druckfarbenzerkleinerung, sondern auch deren Ablösung von der Faseroberfläche unterstützen soll, wurde für alle Versuchspunkte eine nachfolgende Hyperwäsche zur Bewertung der Druckfarbenablösung durchgeführt. Zudem wurde für die obige Versuchsreihe der Druckfarbenaustrag mittels einer Flotation ermittelt.

Während für den Nullpunkt, also unmittelbar nach der Dispergierung, keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Verfahren zu erkennen sind, zeigen sich nach der Wäsche deutliche Differenzen. Zwar führt die alternative Dispergierung auch hier zu einer starken Reduzierung der Schmutzpunktfäche, allerdings wird das Niveau der konventionellen Dispergierung nicht erreicht.

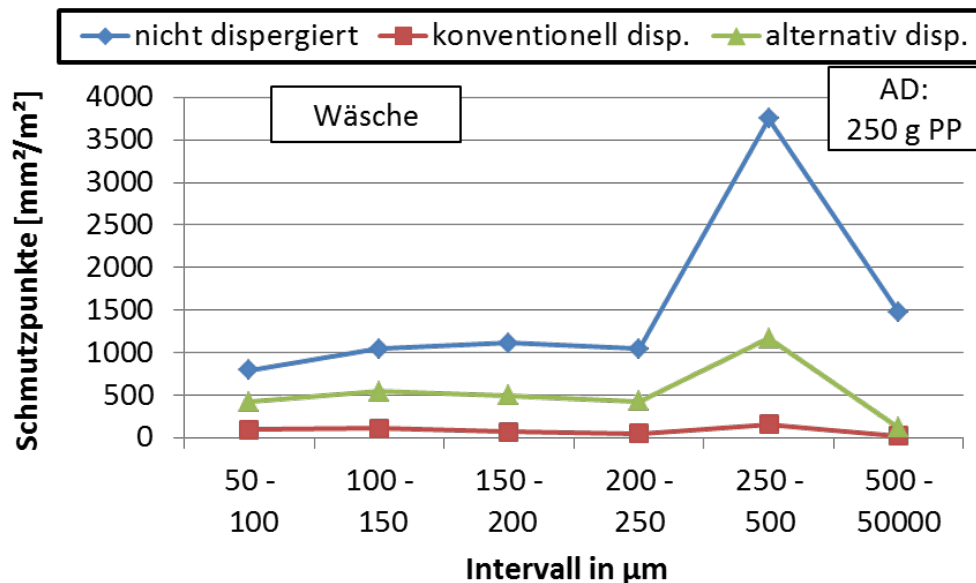


Abbildung 36: Bewertung der Druckfarbenablösung durch Vergleich der Schmutzpunktfäche nach Durchführung einer Hyperwäsche

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die nachfolgende Flotation. Anscheinend können durch die Polymergranulate nicht alle Druckpartikel von der Faseroberfläche abgelöst werden, oder es kommt im geringen Umfang zu einer Rückanlagerung bereits abgelöster Druckfarben.

Beim Vergleich der beiden Dispergiermethoden ist allerdings zu beachten, dass die Granulat-unterstützte Dispergierung in nur einem Prozessschritt bei wesentlich geringeren Temperaturen und insgesamt auch niedrigeren Verweilzeiten stattfindet. Insbesondere die Temperatur – der Technikumsdisperger wird mit Dampf beheizt – nimmt einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Dispergierung und muss als Einflussfaktor für die Granulatbehandlung in Zukunft genauer eruiert werden.

Abbildung 37 fasst die zuvor genannten Resultate noch einmal zusammen.

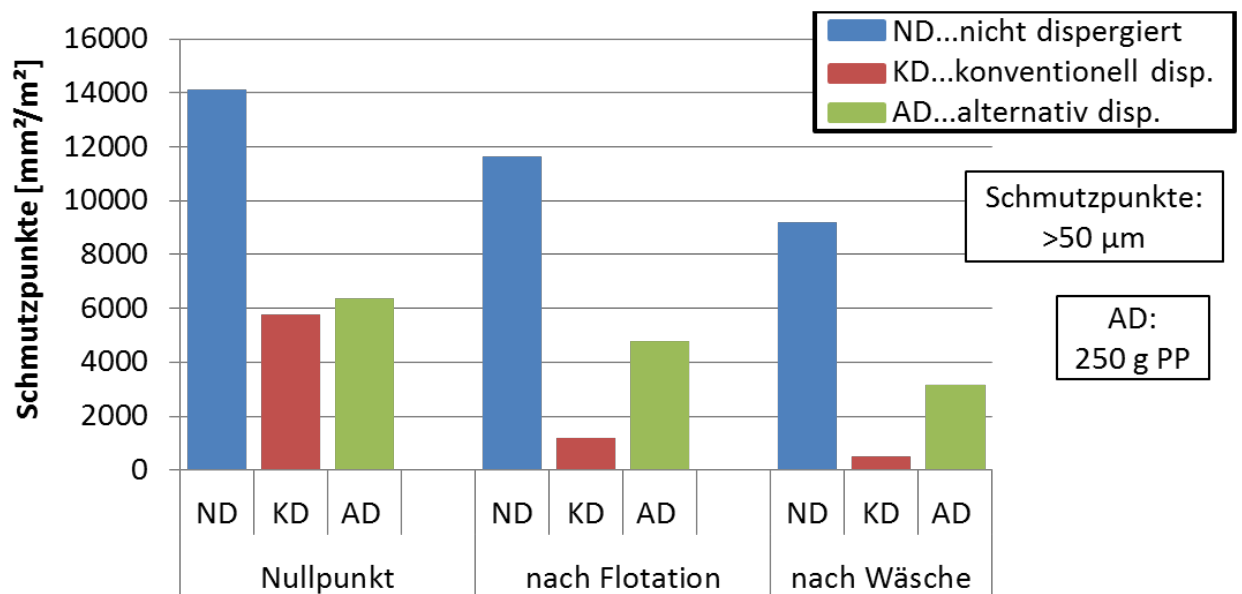


Abbildung 37: Vergleich der Dispergierverfahren: Schmutzpunktfläche nach Nullpunkt (ohne Weiterbehandlung) sowie nachfolgender Wäsche und Flotation

Neben dem UV-Druckmuster wurden die Versuche auch für Magazin- und Zeitungsdruckpapier durchgeführt (allerdings nur mit 200 g Dispergiergranulat). Da jedoch das verwendete Dispergiergranulat Polypropylen beim Magazinpapier und vor allem beim Zeitungsdruckpapier zu einem Druckfarbenaustrag geführt hätte (Adsorptionsdeinking), wurde für diese beiden Druckprodukte Ethylenvinylacetat (EVA) verwendet. Bei diesem Polymer zeigte sich beim Adsorptionsdeinking eine sehr schlechte Druckfarbenanlagerung, wodurch eine Verfälschung durch einen ungewünschten Druckfarbenaustrag minimiert werden sollte.

Wie zu erwarten, ließ sich eine unerwünschte Druckfarbenanlagerung durch den Granulatwechsel nicht vollständig vermeiden, wobei die Verfälschungen durch einen Druckfarbenaustrag beim Zeitungsdruckpapier deutlich ausgeprägter waren. Unabhängig

davon, fielen die Ergebnisse im Vergleich zum UV-Druck weit weniger eindeutig und aussagekräftig aus, wie die nachfolgenden Abbildungen unterstreichen.

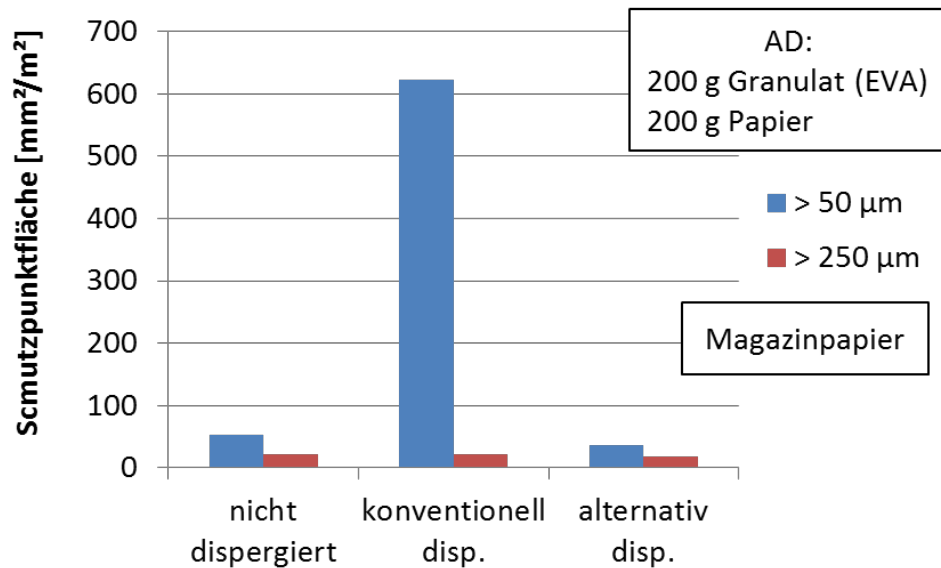


Abbildung 38: Einordnung der alternativen Dispergierung für das Magazinpapier

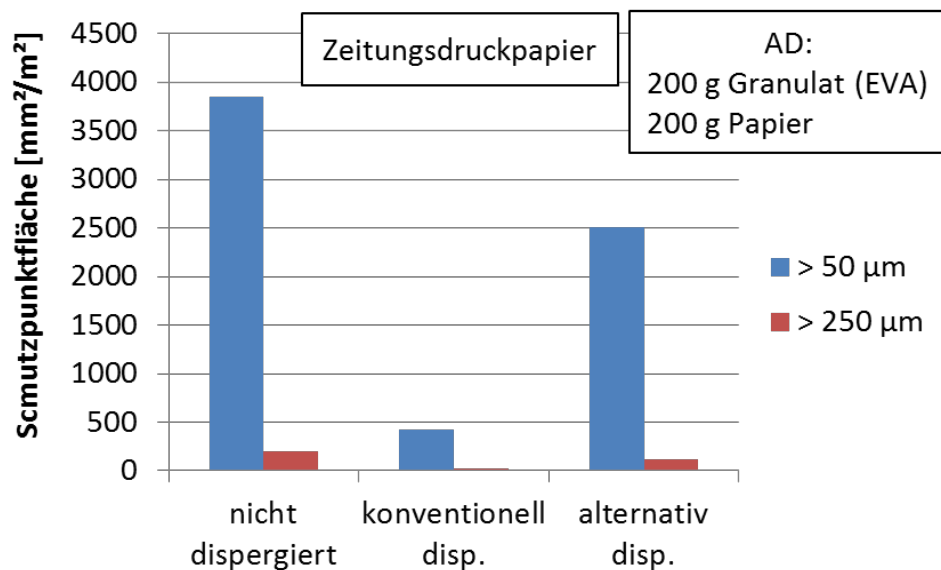


Abbildung 39: Einordnung der alternativen Dispergierung für das Zeitungsdrukpapier

Wie die Abbildungen zeigen, kam es mitunter zu widersprüchlichen Resultaten. So steigt die Schmutzpunktfläche für das Magazinpapier nach der konventionellen Dispergierung unerklärlich hoch an, während die alternative Dispergierung im Vergleich zur unbehandelten Referenz eine Abnahme herbeiführt. Beim Zeitungsdrukpapier hingegen führt die

Technikumsdispergierung zu einer deutlichen Verbesserung. Zwar kommt es durch die Granulat-unterstützte Dispergierung auch zu einer Reduzierung der Schmutzpunktfläche, jedoch fällt der Abstand zum Stand der Technik unerwartet hoch aus.

Neben dem geringfügigen Druckfarbenaustrag durch Adsorption an die Granulatoberfläche hat vermutlich die Eindickung vor der Technikumsdispergierung zu einer fehlerhaften Analyse beigetragen. Im Gegensatz zu den großen Schmutzpunkten beim UV-Druckmuster könnten die wesentlich kleineren Druckpartikel beim Zeitungsdruck- und Magazinpapier über das Filtrat bei der Eindickung entfernt worden sein. Darüber hinaus ist die allgemein geringere Druckfarbenpartikelgröße – und dies gilt insbesondere für das Magazinpapier – kritisch für die Bewertung des Dispergiereffekts, da die Messung mit dem DOMAS-System erst ab einer Größe von 50 µm erfolgt. So können einzelne große Schmutzpunkte innerhalb der Messfläche zu einer Verfälschung der Ergebnisse beitragen, obwohl beide Dispergierv Verfahren im nicht messbaren Bereich zu einer deutlichen Reduzierung der Schmutzpunktgröße führen.

Möglicherweise war auch die Altpapierzusammensetzung zum Zeitpunkt der Probenahme nicht einheitlich. Beim Zeitungsdruckpapier zum Beispiel steigt der Weißgrad nach der konventionellen Dispergierung (KD) ungewöhnlich hoch an und liegt 10 %-Punkte oberhalb der beiden anderen Versuchspunkte (ND, AD). Entsprechend niedriger könnte die insgesamt vorhandene Gesamtdruckfarbenmenge und damit auch die Schmutzpunktfläche für diesen Versuchspunkt sein (KD, Magazinpapier).

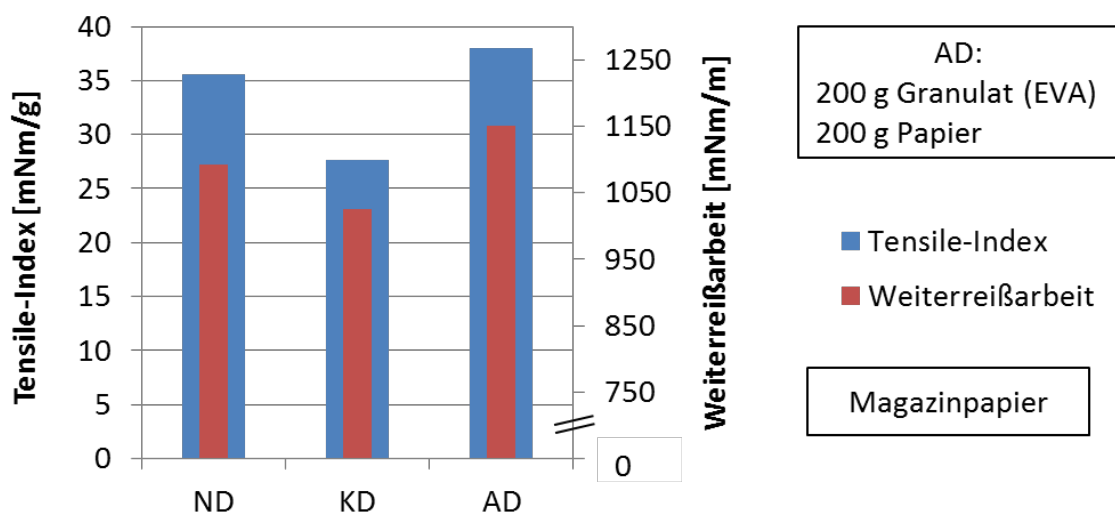


Abbildung 40: Festigkeitsentwicklung durch die verschiedenen Dispergierv Verfahren (dargestellt für Magazinpapier)

Über die Schmutzpunktanalyse hinaus wurde weiterhin der Einfluss der unterschiedlichen Dispergierv Verfahren auf die Blattfestigkeiten untersucht. Dabei zeigten sich in Abhängigkeit der jeweiligen Faserstoffbehandlung durchaus signifikante Differenzen.

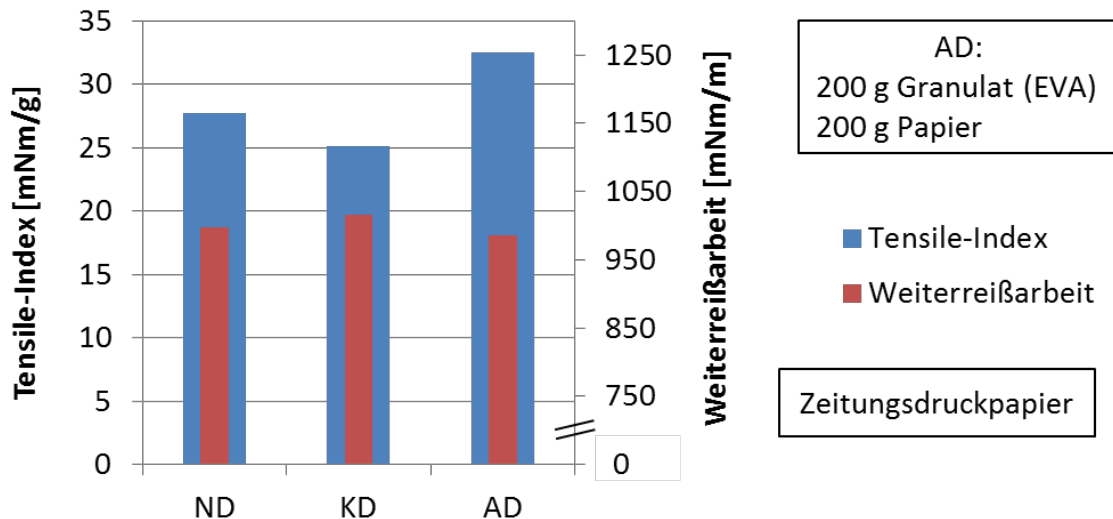


Abbildung 41: Festigkeitsentwicklung durch die verschiedenen Dispergierv Verfahren (dargestellt für Zeitungsdruckpapier)

Ausgehend von der nicht-dispergierten Referenz führte sowohl beim Magazin- als auch beim Zeitungsdruckpapier eine Behandlung im Technikumsdisperger zu einer Verschlechterung der statischen Festigkeiten (Tensile-Index). Im Gegensatz dazu konnte jedoch die alternative Dispergierung eine Steigerung des Tensile-Index herbeiführen. Somit führt die Granulatbehandlung gegenüber einer konventionellen Dispergierung zu einer deutlichen Steigerung des Tensile-Index von 37 % (Mag) beziehungsweise 30 % (ZD).

Für die Weiterreißarbeit als dynamische Festigkeit verhält sich der Sachverhalt differenzierter. Während beim Magazinpapier die Weiterreißarbeit mit dem Tensile-Index korreliert, so ist die Entwicklung beim Zeitungsdruckpapier gegenläufig. Allerdings liegen die absoluten Werte relativ dicht beieinander, so dass – mit Ausnahme vom Zeitungsdruckpapier – keine signifikanten Abweichungen zwischen den beiden Dispergiermethoden vorliegen.

In Anbetracht der dargestellten Festigkeitsentwicklungen scheinen beide Dispergierv Verfahren eine Veränderung der Fasermorphologie herbeizuführen. Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, kommt es infolge der Dispergierung zu einer geringfügigen Faserkürzung, welche zudem von einer Zunahme des Feinstoffanteils begleitet wird. Darüber hinaus

kommt es – ähnlich wie bei der Refiner-Behandlung – zu einer Fibrillierung der Faseroberfläche, was zu einer Erhöhung des Festigkeitspotentials führt.

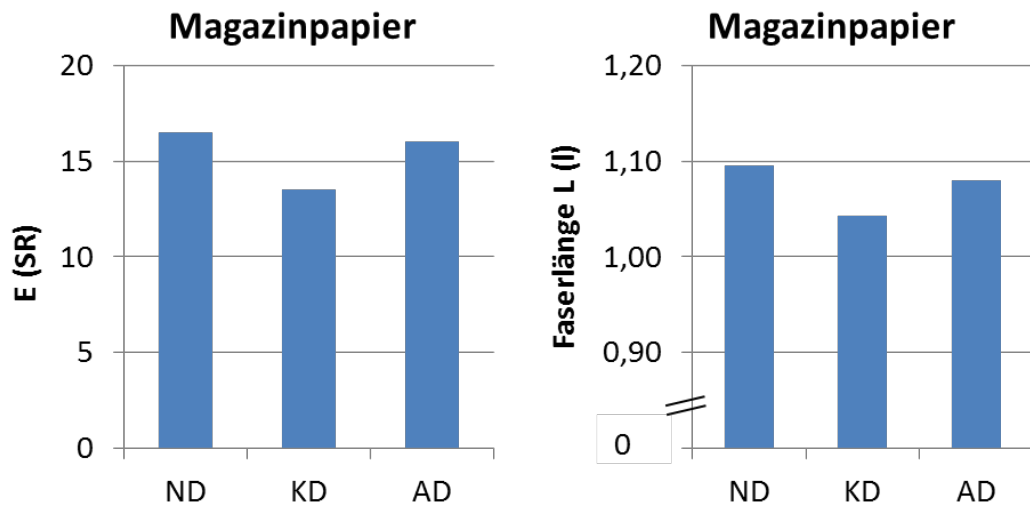


Abbildung 42: Entwässerungswiderstand (links) und Faserlängenentwicklung (rechts) in Abhängigkeit der Faserstoffbehandlung (dargestellt für Magazinpapier)

Obwohl mit der klassischen Dispergierung üblicherweise eine Festigkeitssteigerung erreicht wird, verwundert der doch signifikante Abfall des Tensile-Index beim Magazin- und Zeitungsdruckpapier nicht sonderlich. Diese Druckprodukte bestehen vorwiegend aus kurzen und bereits mehrfach rezyklierten Fasern, die nur noch ein geringes Festigkeitspotential besitzen. Da die alternative Dispergierung dennoch zu einer moderaten Festigkeitssteigerung führt, liegt die Vermutung nahe, dass die Granulate eine wesentlich schonendere und auch fibrillierende Faserstoffbehandlung erlauben und somit auch im Fall von altpapierbasierenden Druckprodukten zu einer Festigkeitssteigerung beitragen können.

Etwas anders stellt sich die Situation beim UV-Druckmuster dar. Durch den hochwertigeren Faserrohstoff führt auch die konventionelle Dispergierung zu einer Festigkeitserhöhung, wobei beide Dispergiervverfahren in etwa das gleiche Festigkeitsniveau erreichen. Dies trifft sowohl für den Tensile-Index als auch für die Weiterreißarbeit zu.

Doch im Gegensatz zu den anderen Druckprodukten führen beide Verfahren nicht nur beim Tensile-Index zu einer deutlichen Verbesserung gegenüber der nicht-dispergierten Referenz. So kann die Weiterreißarbeit um über 20 % (KD: 30 %, AD: 23 %) gesteigert werden, während sich die Festigkeitserhöhung beim Tensile-Index auf immerhin fast 10 % beläuft (KD: 9 %, AD: 7 %).

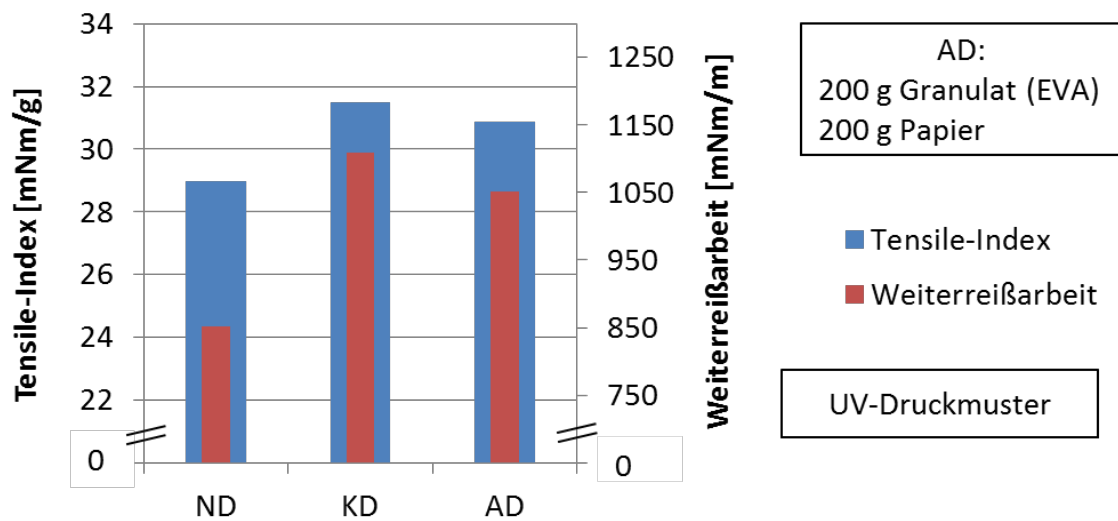


Abbildung 43: Festigkeitsentwicklung durch die verschiedenen Dispergiervverfahren (dargestellt für UV-Druckmuster)

Darüber hinaus kann bei der alternativen Dispergierung durch einen Granulatwechsel eine weitere Festigkeitssteigerung erzielt werden. Der Wechsel von Ethylenvinylacetat (EVA) zu Polypropylen (PP) steigert den Tensile-Index im Vergleich zur Referenz bereits um über 10 %-Punkte, während die Verwendung von Polyamid (PA 6.6) sogar zu einer Erhöhung von fast 20 % führt. Damit erzielt die alternative Dispergierung bei Verwendung von Polyamid-Granulat gegenüber der Technikumsdispergierung einen um 10 % höheren Tensile-Index.

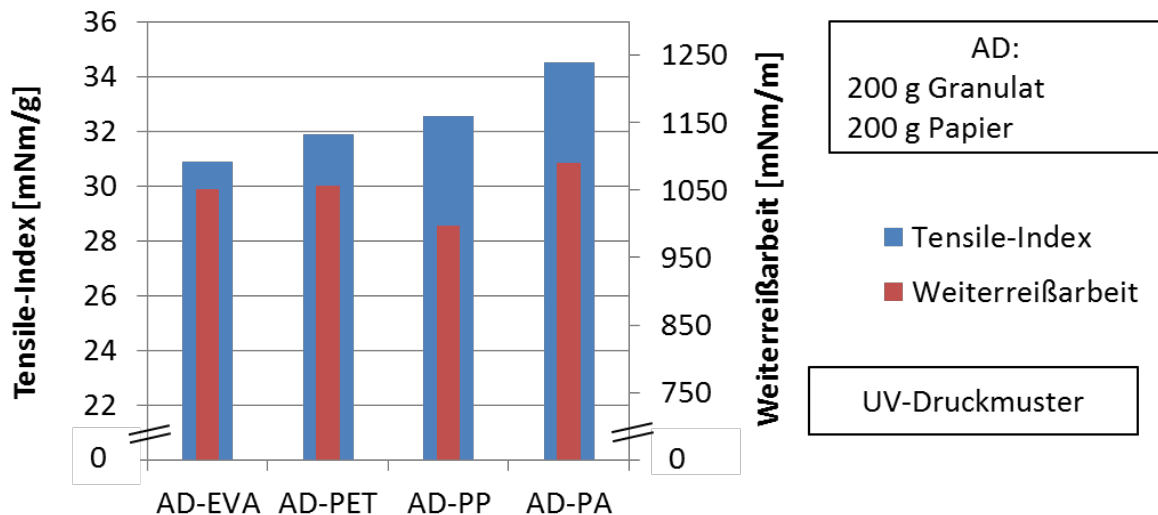


Abbildung 44: Festigkeitsentwicklung bei der alternativen Dispergierung durch Verwendung verschiedener Polymer-Granulate (dargestellt für UV-Druck)

Die Unterschiede aus Abbildung 44 beruhen dabei auf unterschiedliche Granulatgrößen und -formen, den daraus resultierenden und voneinander abweichenden Gesamtoberflächen, sowie wichtigen Polymereigenschaften wie der Dichte und der Oberflächenbeschaffenheit (hart, weich). So verfügt Polyamid über die geringste Partikelgröße, wodurch bei konstanter Einsatzmenge (massebezogen) die höchste Granulatoberfläche bereitgestellt wird, die mit dem Faserstoff in Wechselwirkung treten kann. Zudem liegt die Dichte von Polyamid oberhalb der von Ethylenvinylacetat und Polypropylen. Auch besitzt Polyamid eine wesentlich härtere Oberfläche. Andererseits stellen Ethylenvinylacetat und Polyethylenterephthalat bei gleicher Einsatzmenge die geringste Gesamtoberfläche für die Granulatbehandlung bereit.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass eine unregelmäßige Form, eine möglichst große Gesamtoberfläche sowie eine harte Oberfläche (hohe Dichte) die Festigkeitsentwicklung aus Abbildung 44 begünstigen.

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu prüfen sowie eine statistische Sicherheit zu gewährleisten, wurde der Hauptversuch wiederholt und – zur Identifikation der Einflussgrößen – auch variiert. Hinsichtlich der konventionellen Verfahrensweise wurde als einzige Änderung eine Rückführung des Eindickungsfiltrats nach der Technikumsdispergierung vorgenommen. Im ersten Technikumsversuch hingegen wurde auf eine Rückführung des milchigen Filtrats, indem sich keine Schmutzpunkte befanden, verzichtet. Weiterhin kamen bei der Granulat-unterstützten Dispergierung standardmäßig 200 g anstatt 250 g Granulat zum Einsatz. Darüber hinaus wurden bei der alternativen Dispergierung die Stoffdichte sowie das Papier/Granulat-Verhältnis variiert. Zudem wurden verschiedene Polymergranulate und auch Calciumcarbonat in unterschiedlichen Korngrößen verwendet.

Wie die Abbildung 45 verdeutlicht, fallen zumindest auf den ersten Blick die Ergebnisse für die alternative Dispergierung weniger positiv aus als im ersten Hauptversuch. Zwar werden gegenüber der unbehandelten Referenz wiederum deutliche Verbesserungen erzielt, jedoch kann keines der vier Polymergranulate für die gesamte gemessene Schmutzpunktfläche ($>50\text{ }\mu\text{m}$) das Niveau der Technikumsdispergierung erreichen. Da die Ergebnisse der konventionellen Dispergierung in etwa mit denen des ersten Hauptversuchs vergleichbar sind, sind die Ursachen für diese Abweichungen nicht in der unterschiedlichen Filtratbehandlung zu suchen (im ersten Hauptversuch wurde das Filtrat verworfen und im zweiten Hauptversuch wurde das Filtrat nach der Dispergierung zurückgeführt).

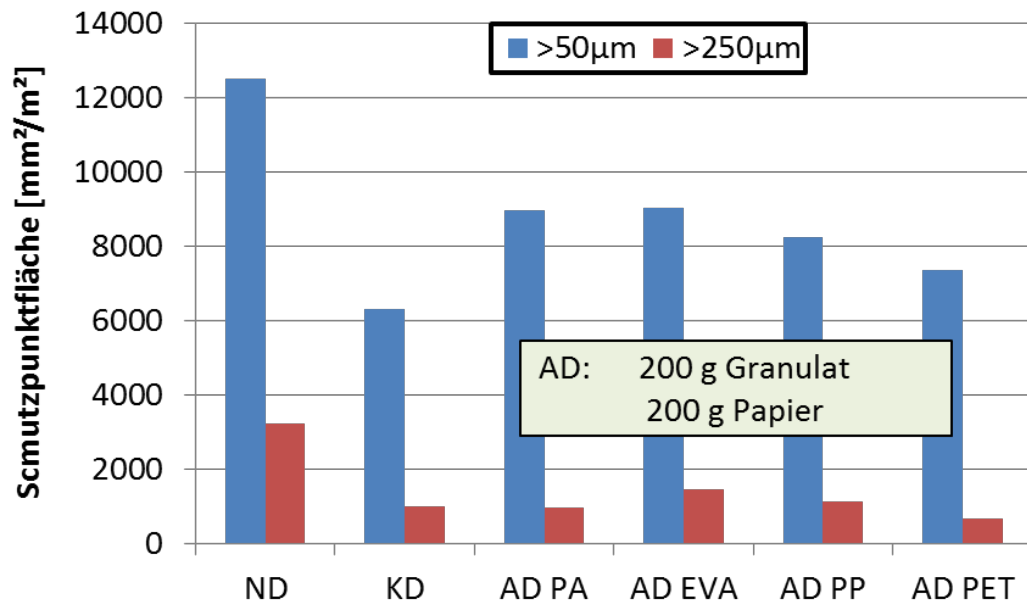


Abbildung 45: Vergleich der alternativen Dispergierung (AD, mit verschiedenen Granulattypen) mit den Referenzpunkten (ND, KD); (für UV-Druck)

Die Hauptursache des etwas schlechteren Abschneidens der alternativen Dispergierung sollte vielmehr auf die im Vergleich zum ersten Hauptversuch um 25 % geringere Granulatmenge zurückzuführen sein. Davon abgesehen waren die Versuche identisch.

Die nächste Abbildung zeigt den direkten Vergleich der Dispergiervverfahren zwischen den beiden Hauptversuchen. Es wird ersichtlich, dass keine signifikanten Abweichungen für die Technikumsdispergierung vorliegen (links), während für die alternative Dispergierung (rechts) aufgrund der unterschiedlichen Granulatmengen deutliche Differenzen auftreten.

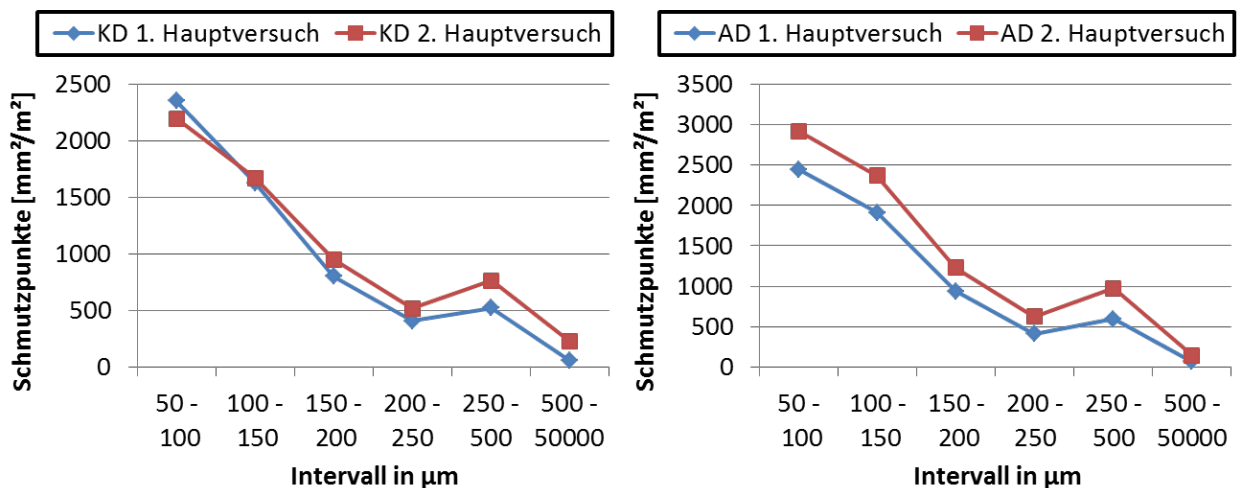


Abbildung 46: Vergleich der Dispergiervverfahren für die beiden Hauptversuche

Unabhängig von der geringeren Granulatmenge und dem damit abgeschwächten Dispergiereffekt werden jedoch auch im zweiten Hauptversuch gute Ergebnisse erzielt. Dies trifft insbesondere für den Bereich der großen Schmutzpunkte zu ($>250\text{ }\mu\text{m}$). Hier erreichen mit Ausnahme des Ethylenvinylacetats (EVA) alle Polymergranulate das Niveau der Technikumsdispergierung. Polyethylenterephthalat (PET) stellte sich für die Zerkleinerung großer Schmutzpunkte sogar als deutlich effizienter heraus.

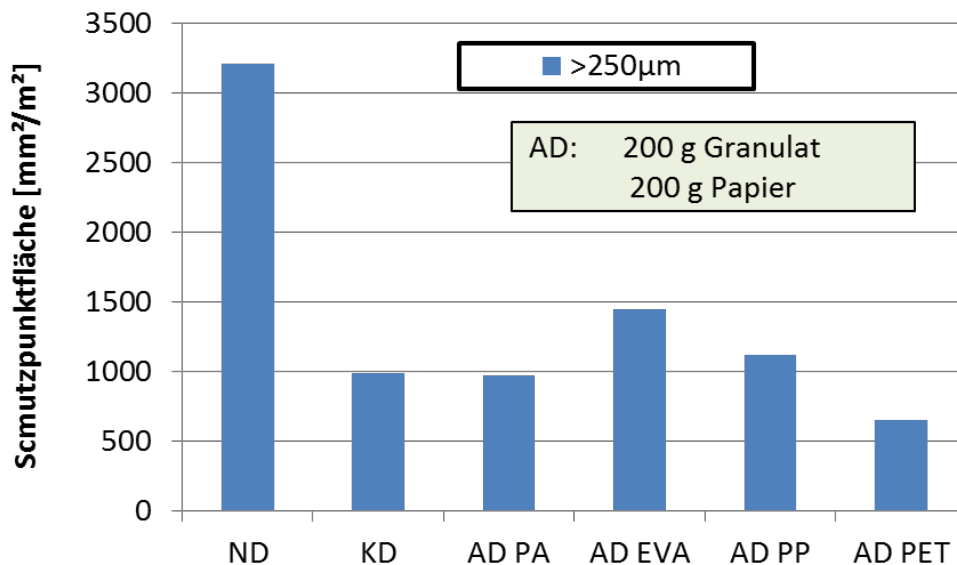


Abbildung 47: Detaillierte Darstellung der Schmutzpunktfäche für den Bereich $> 250\text{ }\mu\text{m}$

Wie bei der schon beschriebenen Festigkeitsentwicklung durch die Granulatbehandlung sind auch im Fall der Dispergiereffizienz die Granulateigenschaften sowie deren Form und Größe entscheidend. So erzielen Polyamid (PA) und Polyethylenterephthalat (PET) als unregelmäßig geformte (ungefähr zylindrisch) und harte Polymergranulate die besseren Resultate, während Polypropylen (PP) und vor allem Ethylenvinylacetat (EVA) weiche Oberflächen und eine eher kugelförmige Erscheinung aufweisen. Da zwei kugelförmige Granulate nur eine geringe Flächenkraft auf ein sich dazwischen befindendes Druckfarbenpartikel ausüben können, ist dies nachvollziehbar. Zumal die einwirkende Dispergierkraft durch die Weichheit der Oberflächen noch weiter abgeschwächt wird.

Durch die Wiederholung des Hauptversuchs mit einer geringeren Granulatmenge wurde bereits festgestellt, dass die zur Verfügung gestellte Granulatoberfläche einen entscheidenden Einfluss auf die alternative Dispergierung nimmt. Abbildung 48 unterstreicht diese Beobachtung und zeigt deutlich auf, dass eine Erhöhung der Granulateinwaage zu

einer sukzessiven Abnahme der Schmutzpunktfäche führt. Für die Variation der Granulatmenge wurde Polyamid verwendet.

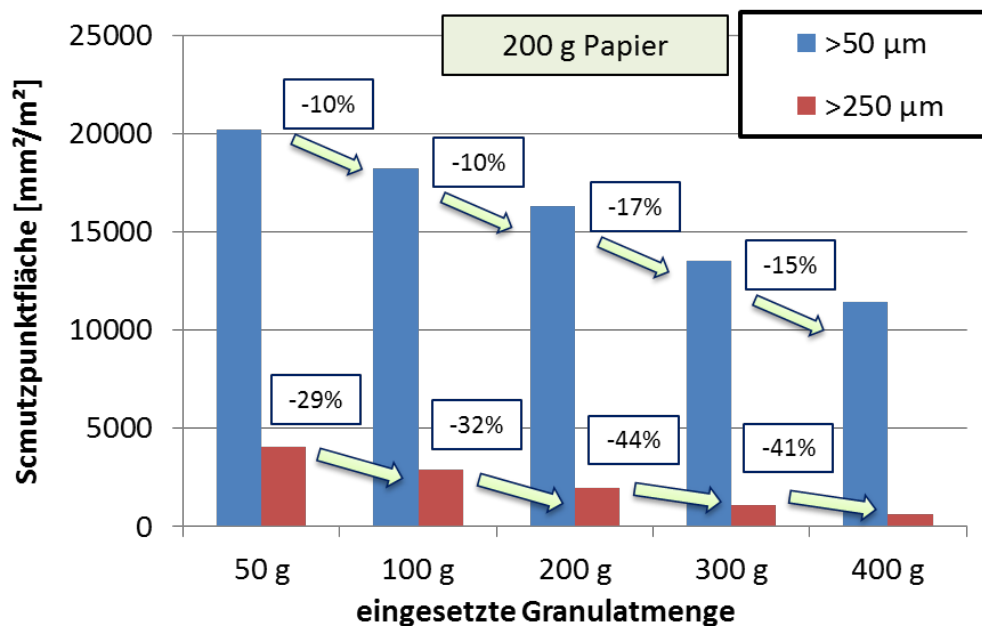


Abbildung 48: Darstellung der Schmutzpunktfäche in Abhängigkeit der eingesetzten Granulatmenge (dargestellt für UV-Druckmuster, jeweils 200 g Einwaage)

Insgesamt lässt sich durch eine Steigerung der Granulatmenge von 50 g auf 400 g eine Reduzierung der Schmutzpunktfäche von 44 % erzielen (für den Gesamtbereich > 50 µm). Für den Bereich großer Schmutzpunkte (>250 µm) beträgt die Reduzierung sogar 84 %.

Auffällig ist, dass ausgehend von 200 g Granulat weitere Erhöhungen der Granulatmengen zu einer besonders ausgeprägten Abnahme der Schmutzpunktfäche führen. Zudem wird ersichtlich, dass der Dispergiereffekt für den Bereich der großen Schmutzpunkte grundsätzlich deutlich stärker ausfällt.

Darüber hinaus war zu beobachten, dass die Schmutzpunkflächenreduzierung infolge der steigenden Granulatmengen auch mit einer Abnahme der mittleren Partikelgröße einhergeht.

Ein ähnliches Bild wie in Abbildung 48 zeigt sich auch für die nachfolgende Wäsche. Allerdings liegt die Reduzierung der Schmutzpunktfäche deutlich über dem Niveau der nicht-gewaschenen Proben. Dementsprechend unterstützen steigende Granulatmengen auch die Druckfarbenablösung von der Faser.

Aufgrund der sehr hohen Dichte von Calciumcarbonat und der damit einhergehenden deutlich geringeren Oberfläche bei konstanter Einsatzmenge konnte das natürlich vorkommende Granulat nicht das Niveau der Polymergranulate erreichen, auch wenn insgesamt eine Verbesserung gegenüber der unbehandelten Referenz erzielt werden konnte. Interessant ist allerdings, dass die Reduzierung der mittleren Partikelgröße mit der Abnahme der Korngröße des Calciumcarbonats einhergeht. Auch wenn dieser Sachverhalt vermutet werden konnte, stellt dies eine wichtige Erkenntnis dar – insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung beziehungsweise die Auswahl besonders geeigneter Dispergiergranulate.

Abschließend erklärt die dargestellte Abhängigkeit der alternativen Dispergierung von der eingesetzten Granulatmenge die Differenz zwischen dem ersten und zweiten Hauptversuch und verdeutlicht weiterhin das Optimierungspotenzial der alternativen Dispergierung. Zwar können aus anlagentechnischer Sichtweise nicht beliebig hohe Granulatmengen eingesetzt werden, jedoch können die Granulateigenschaften dahingehend optimiert werden, dass die absolute Einsatzmenge deutlich reduziert werden kann. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass es sich bei den hier verwendeten Granulaten um Massenpolymere handelt, welche in keiner Weise für den Anwendungszweck der Dispergierung optimiert wurden.

Zuletzt soll die Abhängigkeit der alternativen Dispergierung von einem weiteren wichtigen Einflussfaktor dargestellt werden – der Stoffdichte.

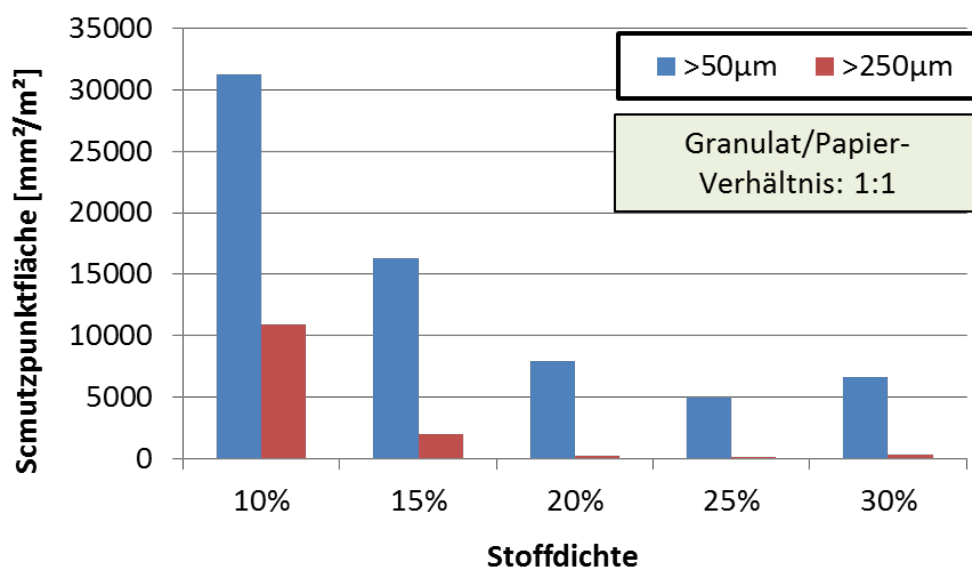


Abbildung 49: Darstellung der Schmutzpunktfäche in Abhängigkeit der Stoffdichte (dargestellt für UV-Druckmuster, Granulat/Papier-Verhältnis: 1:1)

Wie der Abbildung 49 zu entnehmen ist, trägt eine Steigerung der Stoffdichte massiv zu einer Reduzierung der Schmutzpunktfäche und damit zu einer Zerkleinerung der Druckfarbenteilchen bei. Ausgehend von der standardmäßig verwendeten Stoffdichte von 15 % führt eine Reduzierung der Stoffdichte auf 10 % zu einer Verdopplung der Schmutzpunktfäche, während es bei einer Erhöhung der Stoffdichte auf 20 % ungefähr zu einer Halbierung kommt (bezogen auf Schmutzpunkte >50 µm). Für den Bereich der großen Schmutzpunkte (>250 µm) fallen die Differenzen noch deutlicher aus.

Eine weitere Erhöhung der Stoffdichte von 20 % auf 25 % führt zwar nicht mehr zu einer Halbierung der Schmutzpunktfäche, jedoch immerhin noch zu einer Reduzierung von weit über 30 %. Zudem scheint bei der Stoffdichte von 25 % das Optimum für die alternative Dispergierung erreicht, da die Erhöhung der Stoffdichte auf 30 % mit einer Verschlechterung der Dispergiereffizienz einhergeht. Aufgrund des geringen Wasseranteils scheinen die Wechselwirkungen der Granulate mit dem Faserstoff durch eine unzureichende Durchmischung und Homogenisierung abzunehmen. Die Folge sind teilweise nur unzureichend zerkleinerte Druckfarben und damit auch steigende Schmutzpunktfächen. Dies gilt zumindest für die dargestellte Versuchsreihe.

Wie Referenzversuche zeigten, führt auch eine Stoffdichteerhöhung ohne Granulatzufuhr zu einer signifikanten Reduzierung der Schmutzpunktfäche. Allerdings wird durch die Zugabe von Granulaten die Dispergiereffizienz nochmals deutlich gesteigert. Zudem fallen die Abstufungen zwischen den jeweiligen Stoffdichten wesentlich ausgeprägter aus, wie der Verlauf der Schmutzpunktfäche für die verschiedenen Größenklassen verdeutlicht.

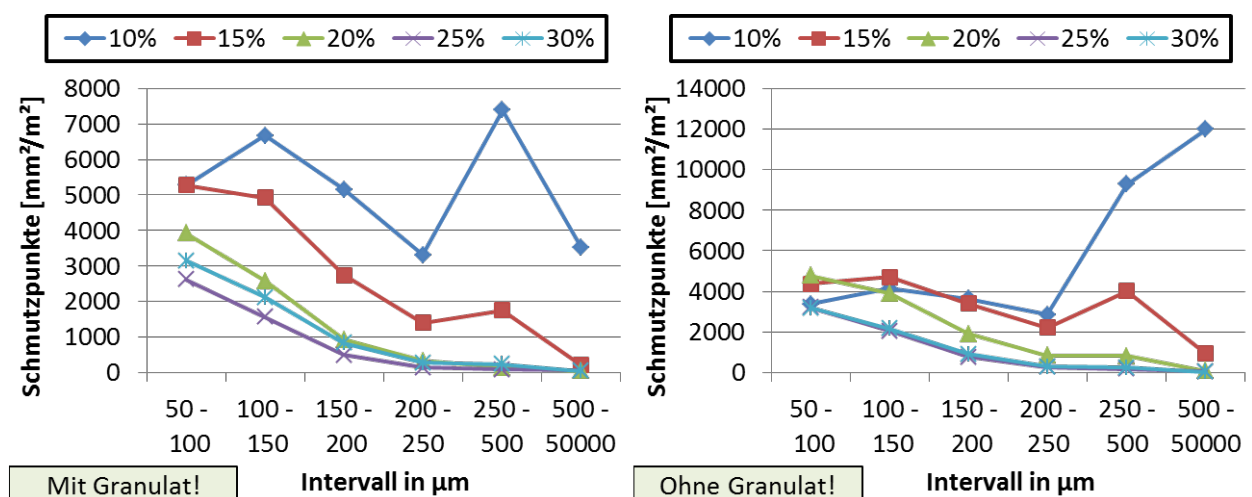


Abbildung 50: Einfluss der Stoffdichte bei der Zerkleinerung mit (links) und ohne (rechts) Granulatzufuhr auf die Schmutzpunktfäche

Vor allem größere und damit besonders kritische Schmutzpunkte werden durch die zusätzlichen Wechselwirkungen des Faserstoffs mit den Granulaten deutlich intensiver zerkleinert als in den Referenzversuchen ohne Granulatzugabe. Die akkumulierten Schmutzpunktfleichen für den Bereich $>250\ \mu\text{m}$ unterstreichen noch einmal die positive Wirkung der Granulatzufuhr auf die Reduzierung der Schmutzpunktfleichen.

Zudem verdeutlicht die Abbildung 51, dass sich für eine maximale Druckfarbenzerkleinerung die Stoffdichte der Granulat-unterstützten Dispergierung im Bereich von 20 % bis 25 % befinden sollte. Zumindest sollte sich die Stoffdichte nicht unterhalb von 15 % befinden, da sonst die notwendigen Reibungskräfte und die daraus resultierenden Wechselwirkungen zu gering ausfallen. In diesem Fall ist die Reduzierung der Schmutzpunktfleichen – vor allem im Vergleich zum Technikumsdisperger – völlig unzureichend, so dass eine weitere Dispergierstufe erforderlich wäre.

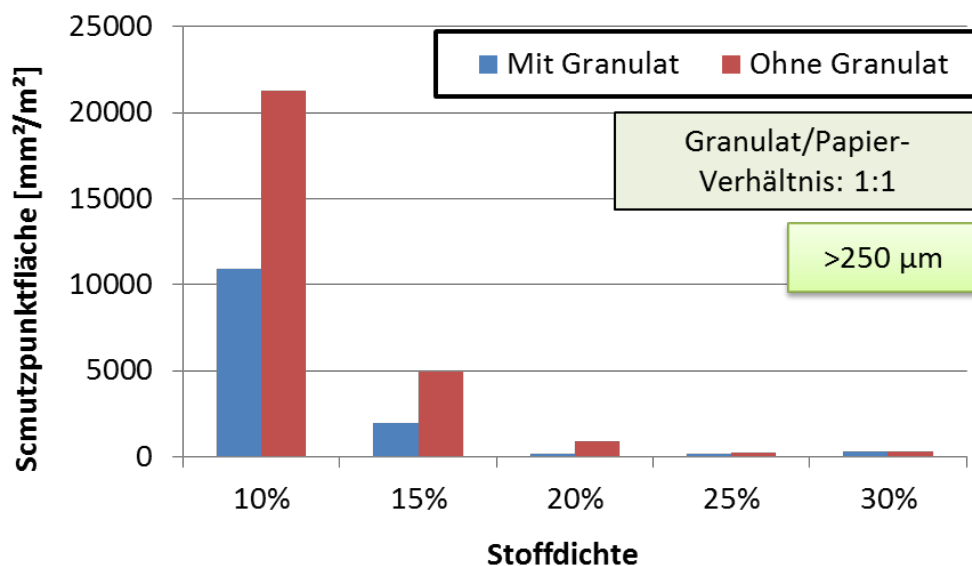


Abbildung 51: Einfluss der Stoffdichte bei der Zerkleinerung mit und ohne Granulatzufuhr auf die großen Schmutzpunkte ($>250\ \mu\text{m}$)

Wie bereits bei den Untersuchungen zur Einsatzmenge der Granulate festgestellt werden konnte, führen auch steigende Stoffdichten nicht nur zu einer Zerkleinerung der Druckfarben, sondern unterstützen ebenfalls deren Ablösung von der Faseroberfläche.

Bei der Gegenüberstellung der alternativen Dispergierung mit der unbehandelten Referenz wird auch nach Durchführung einer Hyperwäsche deutlich, wie sehr die Granulatbehandlung die Dispergierung fördert. Zudem wird auch aus der Abbildung 52 klar ersichtlich, dass sich

die Stoffdichte der alternativen Dispergierung bei wenigstens 15 % befinden sollte, da geringere Stoffdichten zu einem klaren Abfall der Dispergiereffizienz führen. Auch hier, bei Bewertung der Druckfarbenablösung, liegt das Optimum bei einer Stoffdichte zwischen 20 % und 25 %.

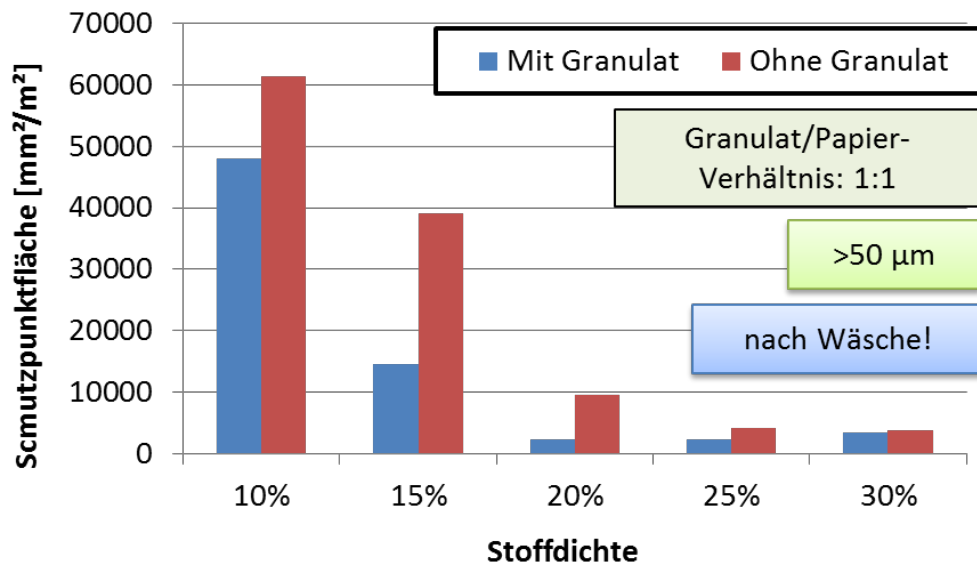


Abbildung 52: Einfluss der Stoffdichte bei der Zerkleinerung mit und ohne Granulatzufuhr auf die Schmutzpunktfäche nach der Hyperwäsche

Abschließend stellt sich bei der alternativen Dispergierung, vor allem im Vergleich zur herkömmlichen Verfahrensweise, die Frage nach der Energieeffizienz. Wie bereits erwähnt, liegt der große Vorteil des alternativen Verfahrens in der Zusammenlegung von Prozessschritten und einer daraus resultierenden Vereinfachung der Stoffaufbereitungskette. Während die konventionelle Dispergierung aus den drei energieintensiven Teilprozessen Zerkleinerung, Eindickung und Dispergierung besteht, erlaubt die alternative Dispergierung eine Zerkleinerung der Druckpartikel in nur einem Prozessschritt. Da die Prozessschritte Eindickung und Dispergierung (inklusive der Bleiche, die allerdings vergleichsweise wenig Energie verbraucht) den Großteil des Energieverbrauchs einer Stoffaufbereitung einnehmen, verdeutlicht dies das erhebliche Einsparpotenzial der alternativen Dispergierung, welche zumindest im Labormaßstab simultan zur Zerkleinerung erfolgt – und damit bei einem deutlich geringeren Energieeinsatz. Vor dem Hintergrund des noch vorhandenen Optimierungspotenzials, das mittelfristig eine vergleichbare Qualität zum Stand der Technik ermöglichen könnte, ist dies ein klarer Vorteil für das alternative Verfahren.

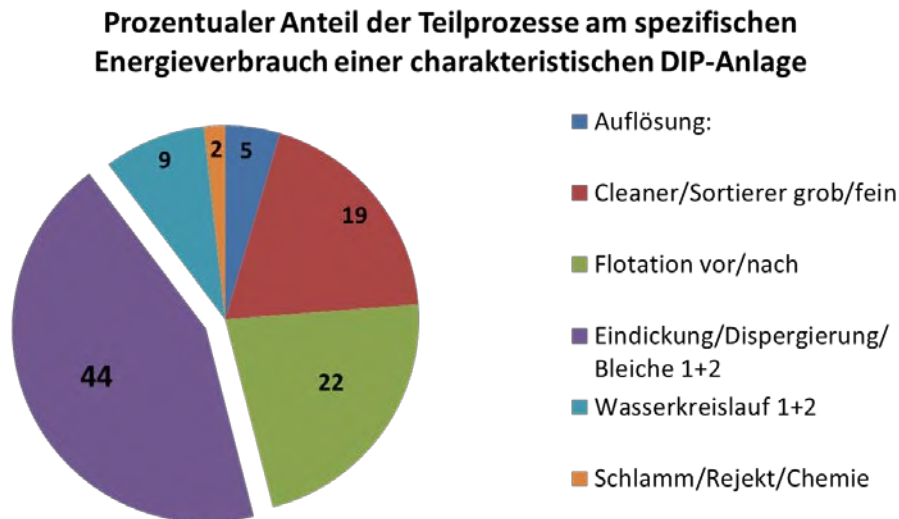


Abbildung 53: Energiebedarf einer Stoffaufbereitung nach Teilprozessen geordnet

Die Abbildung 53 zeigt den Energiebedarf einer charakteristischen Stoffaufbereitung (DIP). Es wird deutlich, dass die konventionelle Dispergierung, inklusive der notwendigen Eindickung sowie der Bleiche, mit 44 % den größten prozentualen Anteil am Gesamtenergiebedarf einnimmt.

Durch die Integration der Granulat-unterstützten Dispergierung in den Auflöseprozess, auf den mit unter 10 % ein nur geringer Anteil am Gesamtenergieverbrauch entfällt, verdeutlicht sich das Einsparpotenzial des neuen Verfahrens. Durch die notwendige Abtrennung der Granulate würde sich zwar der Energiebedarf für den Bereich Cleaner/Sortierer (oder einer anderen Separationstechnik) erhöhen, jedoch sollte bei erfolgreicher Substitution und damit Wegfall der herkömmlichen Dispergierung eine Energieeinsparung von wenigstens 20 % bis 30 % bezogen auf den Gesamtenergiebedarf möglich sein.

In absoluten Zahlen ausgedrückt benötigt die Dispergierung 30–150 kWh/t, die Eindickung 10–15 kWh/t und die Zerfaserung 10–40 kWh/t. Eine typische Sortierstufe wird mit 5–20 kWh/t angegeben, wobei der Maximalbereich als Referenz für die Granulatabtrennung herangezogen werden soll / (2)/.

Im Mittel benötigt damit eine einstufige konventionelle Dispergierung einen spezifischen Energiebedarf von 127,5 kWh/t, während die Granulat-unterstützte Dispergierung mit 45 kWh/t deutlich weniger Energie verbraucht. Auch wenn die Abtrennung und Rückführung der Granulate deutlich energieintensiver ausfallen sollte, würde die Energieeinsparung gegenüber der konventionellen Dispergierung noch immer im (hohen) zweistelligen Bereich

liegen. Auch darf nicht vergessen werden, dass hohe Prozessstoffdichten nicht nur die alternative Dispergierung unterstützen, sondern auch gleichzeitig die spezifischen Energiekosten der Zerkleinerung signifikant reduzieren, womit die positive Energiebilanz dieses Verfahrens weiter verbessert wird.

4.5 Zusammenfassung

Es hat sich herausgestellt, dass durch die Verwendung von Granulaten beim alternativen Dispergierprozess nicht nur die Zerkleinerung von Druckfarben unterstützt wird, sondern auch deren Ablösung von der Faseroberfläche. Dabei ist die Granulat-unterstützte Dispergierung, welche simultan zur Zerkleinerung in nur einem Prozessschritt stattfindet, in der Lage, nahezu die Resultate einer herkömmlichen Dispergierung zu erzielen. Da die konventionelle Dispergierung in mehreren meist energieintensiven Teilprozessen erfolgt, bietet das alternative Verfahren zudem die Möglichkeit, hohe Energieeinsparungen zu erzielen. Darüber hinaus steht die Entwicklung dieses Verfahrens erst am Anfang, wodurch weitere Verbesserungen durch die noch vorhandenen Optimierungspotenziale zu erwarten sind.

Die Effizienz der Granulat-unterstützten Dispergierung hängt maßgeblich von der Stoffdichte und vom eingesetzten Granulat selbst ab. Beim Granulat ist die eingesetzte Menge, das heißt die zur Verfügung gestellte Oberfläche, welche sich aus der Form und Größe ergibt, sowie die Granulatart entscheidend (Material des Granulats, Oberflächenbeschaffenheit, Dichte). Wie die Versuche zeigten, wird die Effizienz der alternativen Dispergierung durch

- steigende Stoffdichten, (und hinsichtlich der Granulate)
- steigende Einsatzmengen,
- eine zunehmende Gesamtoberfläche,
- höhere Dichten und härtere Oberflächen sowie
- eher eckige als kugelförmige Granulate

positiv beeinflusst.

5 Ausblick

Für die Zerkleinerung, Druckfarbenentfernung und Dispergierung wurden alternative Technologien vorgestellt, deren Ziel es war, durch Wasserverzicht beziehungsweise einer Kombination von Teilprozessen eine deutliche Energieeinsparung gegenüber dem Stand der Technik zu erzielen. Hinsichtlich der Faserstoffqualität, dem zugrunde liegenden Einsparungs- und Optimierungspotenzial sowie der Erfolgsaussicht auf eine großtechnische Umsetzung wurden dabei für die beiden Verfahren unterschiedliche Ergebnisse festgestellt.

5.1 Trockenzerkleinerung

Auch wenn die Zielstellungen des Projekts zu weiten Teilen erreicht werden konnten, stellt das Verfahren der trockenen Faserstoffgewinnung und anschließenden Druckfarbenentfernung zumindest kurz- bis mittelfristig keine ernsthafte Alternative zu den etablierten Technologien dar.

Zunächst müssen die beschriebenen Defizite hinsichtlich der Faserstoffqualität genauer untersucht und durch geeignete Optimierungsansätze behoben werden. Weiterhin stellt die starke Staubentwicklung während der Trockenzerkleinerung eine ernsthafte Gefahr dar, welche es durch geeignete Maßnahmen zu minimieren gilt. Zudem wurde die Trockenzerkleinerung ausschließlich für „saubere“ und vorzerkleinerte Altpapiere durchgeführt. In wie weit eine Trockenzerkleinerung ohne vorgeschaltete Abtrennung der groben Verunreinigungen sowie einer Vorzerkleinerung möglich ist, gilt es ebenfalls zu prüfen.

Grundsätzlich jedoch, bietet der Verzicht auf Wasser ein sehr großes Einsparpotenzial bei der Zerkleinerung und insbesondere bei der Druckfarbenentfernung. Jedoch besteht hinsichtlich der Faserstoffqualität und der prozesstechnischen Umsetzung ein erheblicher Forschungsbedarf.

5.2 Dispergierung durch Adsorptionsdeinking

Für die erste wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der hier beschriebenen alternativen Dispergierung wurden gute und äußerst vielversprechende Ergebnisse erzielt. Die grundsätzliche Machbarkeit des Funktionsprinzips sowie die Möglichkeit der Kombination von Teilprozessen wurden erfolgreich nachgewiesen.

Durch die Zugabe von geeigneten Granulaten konnte die Dispergierung simultan zur Zerfaserung erfolgen, wobei bei deutlich geringeren Energieeinsätzen nahezu vergleichbare Resultate zur herkömmlichen Dispergierung erreicht wurden – und dies ohne jegliche Optimierung.

Ein wesentlicher Forschungsbedarf für die Zukunft besteht in der Entwicklung besonders geeigneter Granulate, welche bei reduzierten Einsatzmengen eine Steigerung der Dispergiereffizienz erlauben sollen. Zudem wird es entscheidend sein, eine energiesparende Abtrennung der Granulate zu entwickeln, wodurch diese zu nahezu 100 % zurückgeführt und wieder eingesetzt werden können.

Darüber hinaus muss der optimale Einsatzort des Verfahrens eruiert und festgelegt werden. In wie weit der Pulper, welcher für die Laboruntersuchungen verwendet wurde, für diese Aufgabe geeignet ist, bleibt abzuwarten. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der papierfremden Bestandteile, mit denen das Altpapier verunreinigt ist.

Grundsätzlich bietet das Verfahren die realistische Chance einer mittelfristigen Überführung in die Praxis, da im Gegensatz zum Adsorptionsdeinking weit weniger kritische und unbeantwortete Fragen im Raum stehen. Beispielsweise ist es hinfällig, eine Druckfarbenanlagerung an die Granulatoberfläche zu erzielen, womit die Problematik der Reinigung entfallen kann.

Literaturverzeichnis

1. **Holik, H.** *Unit operations and equipment in recycled fiber processing*. [Hrsg.] L. Götttsching und H. Pakarinen. Helsinki : Fapet Oy, 2000. S. S. 91 ff. Bde. Papermaking Science and Technology - Recycled Fiber and Deinking.
2. **Holik, Herbert.** *Unit operations and equipment in recycled fiber processing*. [Hrsg.] L. Götttsching und H. Pakarinen. Helsinki : Fapet Oy, 2000. S. 94, Table 2. Bde. Papermaking Science and Technology - Book 17: Recycled Fiber and Deinking.