



FORSCHUNG

BERATUNG

MESSTECHNIK

WEITERBILDUNG

PTS-FORSCHUNGSBERICHT

**ENTWICKLUNG EINER PRAXISNAHEN UND EFFIZIENTEN
BESCHREIBUNG DER KOMPLEXEN PROZESSE BEI DER
ABTRENNUNG VON VERUNREINIGUNGEN IN DER FLOTA-
TION AM BEISPIEL DER DRUCKFARBENENTFERNUNG IN
DER ALTPAPIERSTOFFAUFBEREITUNG**

Entwicklung einer praxisnahen und effizienten Beschreibung der komplexen Prozesse bei der Abtrennung von Verunreinigungen in der Flotation am Beispiel der Druckfarbenentfernung in der Altpapierstoffaufbereitung

G. Meini

Inhalt

1	Zusammenfassung	2
2	Abstract	3
3	Einleitung	4
4	Vorgehen	6
5	Einflussfaktoren und deren Messbarkeit	8
6	Beschreibung zur Charakterisierung der Stoffauflösung	13
6.1	Größenverteilung der Druckfarbenpartikel	13
6.2	Mechanismus Druckfarbenzerkleinerung / -agglomeration.....	15
6.3	Mechanismus Druckfarbenablösung / -wiederanlagerung.....	18
7	Beschreibung zur Charakterisierung der Flotation, Mechanismus Druckfarbenaustrag	21
7.1	Modellierungsansätze.....	21
7.2	Untersuchungen zur Übertragbarkeit des Mixed Flow Modells	22
7.3	Zusammenfassende Ergebnisse für Modellauswahl sowie den Inputgrößen Rejektrate (Überlaufverhältnis) und Altpapiereinsatz	24
7.4	Modellierung der Größenverteilung	26
8	Übertragung auf andere Industriebranchen	28
8.1	Industriebranchen	28
8.2	Anwendung der Flotation am Beispiel der Mineralstoffindustrie	29
8.3	Anwendung der Flotation in unterschiedlichen Industriebranchen	29
8.4	Zuordnung der angewandten Prozessschritte zu den 3 Teilmechanismen.....	31
	Literaturverzeichnis	35

1 Zusammenfassung

Thema	Entwicklung einer praxisnahen und effizienten Beschreibung der komplexen Prozesse bei der Abtrennung von Verunreinigungen in der Flotation am Beispiel der Druckfarbenentfernung in der Altpapierstoffaufbereitung
Ziel des Projekts	Ziel war die Entwicklung einer praxisnahen und effizienten Beschreibung der Abtrennung von Verunreinigungen aus einer Suspension am Beispiel der Druckfarbenentfernung für die Prozessstufen Stoffauflösung und Flotation.
Ergebnisse	<p>Zur mathematischen Beschreibung wurden die Vorgänge bei der Abtrennung von Verunreinigungen auf 3 physikalische Grundmechanismen abgebildet:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ablösung bzw. Anlagerung von Verunreinigungen am Sortiergut, • Zerkleinerung bzw. Agglomeration von Verunreinigung und • Austrag von abgelösten, frei in der Suspension vorhandenen Verunreinigungen. <p>Die Modellbildung erfolgte mittels statistischer Auswertungen von Messdaten. Erstmals wurden einzeln gemessene Größenklassen anhaftender und freier Druckfarbenpartikel zu einer Größenverteilung zusammengefasst, mit der sich Massebilanzen und Änderungen der mittleren Partikelgröße über den gesamten Prozess der Stoffaufbereitung mathematisch eindeutig beschreiben lassen.</p>
Schlussfolgerung	<p>Mit diesem neuen Modellierungsansatz konnte durch die Modularisierung eine Möglichkeit geschaffen werden, eine detaillierte, ganzheitliche Prozessbeschreibung anhand der bekannten physikalischen Mechanismen zu erstellen, die bei der Abtrennung von Druckfarbenpartikel wirken.</p> <p>Die Anwendung der Forschungsergebnisse in Dienstleistungsprodukten der PTS ermöglicht eine deutlich bessere Beratung kleinerer und mittlerer Unternehmen bei der Optimierung von Prozesstechnologie und Produktqualität.</p> <p>Mit Hilfe messtechnisch gut beherrschbarer Einflussgrößen und den mathematischen Beschreibungen lassen sich Möglichkeiten für die Unternehmen aufzeigen, Optimierungen an Altpapier- und Chemikalien-Einsatz, Energieverbrauch und Stoffverlusten unter ökonomischen Gesichtspunkten vorzunehmen. Exemplarisch wurden Einsparpotentiale von bis zu 2,7 €/t Altpapier ermittelt.</p> <p>Die Ergebnisse des Projektes dienen als Basis für die Entwicklung eines neuen Berechnungskonzeptes zur Prognose des Weißgrades im Fertigpapier.</p>
Danksagung	Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens IW 071029 gewonnen, das im Programm zur "Förderung von Forschung und Entwicklung bei Wachstumsträgern in benachteiligten Regionen" mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über den Projektträger EuroNorm Gesellschaft für Qualitätssicherung und Technologie mbH aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

2 Abstract

Thema	Developing a practically relevant, efficient description of the complex processes involved in the removal of contaminants during flotation, using the deinking process of recycled fibre treatment as example
Project objective	Aim of this project was the development of a practically relevant, efficient description of contaminant removal from suspensions, using the deinking process of the process stages defibration and flotation as examples.
Results	<p>To describe them mathematically, the processes involved in the removal of contaminants were mapped onto three basic mechanisms of physics:</p> <ul style="list-style-type: none"> • contaminant detachment from or attachment to materials for screening • comminution or agglomeration of contaminants and • discharge of detached contaminants present as free particles in the suspension. <p>The model development was based on statistical evaluations of measuring data. For the first time ever, separately measured size classes of adhering and free ink particles were combined in a size distribution which can be used to derive clear mathematical descriptions of the mass balances and changes in average particle size across the entire process of stock preparation.</p>
Conclusion	<p>The modular design of the new modelling approach makes it possible to describe the process comprehensively and in detail, based on the well-known physical mechanisms governing the removal of ink particles.</p> <p>The research results can be used in service products of PTS to provide clearly improved consulting services to small and medium-size enterprises wishing to optimise their process technology and product quality.</p> <p>By means of easily measurable and analytically controllable parameters and the mathematical descriptions elaborated, it will be possible to identify ways how companies can economically optimise their use of recovered paper and chemicals, energy consumption and stock losses. By way of example, potential savings of up to 2,7 €/t of recovered paper were identified.</p> <p>The project results serve as a basis for the development of a new calculation concept to forecast the brightness of finished paper.</p>
Acknowledgement	The research project IW 071029 was funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology BMWi in the programme “Förderung von Forschung und Entwicklung bei Wachstumsträgern in benachteiligten Regionen” (promotion of research, and development for growth drivers in economically weaker regions) and carried out under the umbrella of EuroNorm Gesellschaft für Qualitätssicherung und Technologie mbH in Berlin, based on a resolution of the German Bundestag We would like to express our warm gratitude for this support.

3 Einleitung

Überblick

In zahlreichen Industriebranchen müssen Verunreinigungen von den gewünschten Stoffen, den so genannten Gutstoffen oder auch Sortiergut genannt, abgetrennt werden. Aufgrund der Größe und der physikalischen Eigenschaften dieser Verunreinigungen ist dazu sehr oft das Flotationsverfahren am besten geeignet [1, 2, 3, 4].

Industrielle Prozesse, bei denen die Flotation als Verfahren eingesetzt wird, sind in der Regel Standardverfahren mit hohen Durchsätzen und stehen unter einem erheblichen Kostendruck. Die Beeinflussung der Kosten ist in der Verfahrensentwicklung und auch durch Optimierung der laufenden Anlage möglich.

Anforderungen an das Verfahren und an die Kosteneffizienz

Die Abtrennung von Verunreinigungen, insbesondere von Druckfarbenpartikeln in der Papierindustrie, ist derzeit mit folgenden Problemen konfrontiert:

- Zunehmende Belastung der Ausgangsstoffe mit Verunreinigungen
- Steigende Anforderungen an das Endprodukt und damit
- Höhere Anforderungen an die Verfahren zur Entfernung
- Zunehmender Kostendruck
- Hohe Komplexität der Mechanismen bei der Druckfarbenentfernung
- Bedarf an effizienten Methoden zur Optimierung

Geschlossene mathematische Beschreibung als Chance

Eine vollständige quantitative Beschreibung dieser Trennverfahren macht diese einer computerbasierten Optimierung zugänglich. Damit können die Weiterentwicklung, die Auslegung und der Betrieb dieser Trennverfahren kostengünstiger gestaltet werden.

Umfangreiche Forschungsarbeiten haben eine Beschreibung einzelner physikalischer Vorgänge der unterschiedlichen Trennverfahren, auch der Flotation, mit mathematischen Mitteln beschreibbar gemacht [5, 6, 7, 8]. Für eine praxistaugliche Optimierung der Trennverfahren sind diese Beschreibungen nur bedingt geeignet, da nur Teilaspekte des gesamten Verfahrens beschrieben werden und vorwiegend Größen verwendet werden, die nicht oder nicht mit ausreichender Güte messbar sind.

Eine geschlossene, praxistaugliche Beschreibung des Trennverfahrens anhand leicht messbarer Parameter lag zu Beginn des Projektes nicht vor.

Offene Fragen

Eine Auswertung der zitierten Ansätze für eine Beschreibung der Druckfarbenentfernung im Flotationsverfahren ergab offene Fragen und Schwachstellen.

Komplexität

Bei dem überwiegenden Anteil der Beschreibungen werden zahlreiche Parameter berücksichtigt. Dies führt zu einer hohen Komplexität der daraus abgeleiteten mathematischen Zusammenhänge.

Vollständigkeit	<p>Alle dargestellten Ansätze beschreiben den Austrag von Verunreinigungen, insbesondere von Druckfarbenpartikeln, bei der Deinkingflotation bzw. bei anderen Verfahren der Stoffaufbereitung.</p> <p>Die derzeit in der Literatur verfügbaren Beschreibungen zur Druckfarbenentfernung sind als nicht vollständig zu betrachten und können die realen Prozesse nicht realitätsnah genug abbilden, da sie</p> <ul style="list-style-type: none">• die Ablösung der Druckfarbenpartikel von der Faser nur am Rande erwähnen und nicht weiter berücksichtigen.• und weitere entscheidende Effekte,<ul style="list-style-type: none">• der Zerkleinerung der Druckfarbenpartikel durch Scherkräfte,• der Agglomeration von kleinen Druckfarbenpartikeln zu größeren Schmutzpunkten und• der Wiederanlagerung von Druckfarbenpartikeln an die bereits aufgearbeitete Faser am Ende der Stoffaufbereitungnicht betrachtet werden.
Messbare Parameter	<p>Die Beschreibungen berücksichtigen in der Regel Parameter, die entweder überhaupt nicht oder mit sehr hohem Aufwand messtechnisch erfasst werden können. Dadurch müssen bei der Anwendung derartiger Modellansätze zahlreiche Annahmen getroffen werden, die experimentell und/oder in Praxismessungen nicht nachgewiesen werden können.</p>
Optimierungsstrategie	<p>Die hohe Anzahl von Einflussfaktoren auf das Deinkingergebnis erschwert Optimierungen in der Praxis erheblich. Meist werden in Papierfabriken nur wenige Größen mehr oder weniger subjektiv für eine Optimierung ausgewählt. Diese Auswahl kann je nach Chemikalienlieferant, Anlagenbauer oder Papierfabrik unterschiedlich ausfallen. Dadurch kann zwar eine Verbesserung des Ergebnisses erreicht werden, ob dabei alle potenziellen Möglichkeiten ausgeschöpft bzw. berücksichtigt werden, bleibt offen. Zudem sind Untersuchungen mit zahlreichen Einflussfaktoren sehr aufwendig und teuer.</p>

4 Vorgehen

Wirksame Mechanismen

Bei der Entfernung der Druckfarbenpartikel wirken verschiedene Mechanismen. Zuerst werden die Druckfarben von der Faseroberfläche abgelöst. Dies erfolgt hauptsächlich bei der Zerfaserung des Altpapiers und wird durch Zugabe von Deinkingchemikalien unterstützt.

Anschließend können die so abgetrennten Druckfarbenpartikel mit Hilfe des Flotations-Deinking-Verfahrens abgetrennt und ausgetragen werden.

Durch verschiedene Verfahrensschritte innerhalb der Stoffaufbereitung finden zusätzlich Zerkleinerungs-, Agglomerations- und Wiederanlagerungsprozesse statt. Diese Mechanismen bewirken je nach Verfahrensschritt und dabei betroffenen Partikelgrößenklassen eine Begünstigung bzw. eine Verschlechterung des Druckfarbenaustrags bei der Deinkingflotation.

Einflussfaktoren

Bei der Druckfarbenentfernung hängt die Menge an Druckfarbenpartikeln, die letztendlich im Fertigpapier verbleiben, von vielen Einflussfaktoren ab. Dies führt zu einer sehr schwierigen und aufwendigen Auslegung und Optimierung der für den Druckfarbenaustrag notwendigen Aggregate. In der Praxis werden aus diesem Grunde immer nur Teilaspekte herausgegriffen [9, 10]. Ein Gesamtoptimum kann so jedoch nicht erreicht werden.

3-Mechanismen-Modell

Zur Realisierung der Projektziele wurde aus dem derzeitigen Stand der Technik folgender Modellansatz zur Druckfarbenentfernung aus Faserstoffsuspensionen abgeleitet und umgesetzt:

- Die Druckfarbenpartikel werden in jedem Stoffstrom in „Attached Ink“ (an der Faser anhaftend) und in „Free Ink“ (in Suspension) aufgeteilt.
- Die Druckfarbenpartikel werden in Größenklassen unterteilt. Für die Modellierung wird daraus eine geeignete statistische Normalverteilung gebildet (siehe Abschnitt 6.1).
- Die Druckfarbenentfernung erfolgt in 3 getrennten physikalischen Mechanismen (M1 –M3):

M1: Ablösung / Wiederanlagerung

Bestimmte Prozessstufen sorgen dafür, dass Attached Ink in Free Ink oder umgekehrt umgewandelt wird (z.B. Zerfaserung, Disperger u.a.). Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte ein Modell für die Stoffauflösung bei Ablösung / Wiederanlagerung erstellt werden (siehe Abschnitt 6.3)

M2: Zerkleinerung / Agglomeration

Bestimmte Prozessstufen sorgen dafür, dass ein Teil der Free Ink zerkleinert bzw. agglomert wird (z.B. Zerfaserung, Disperger u.a.). Es wird davon ausgegangen, dass Attached Ink nicht zerkleinert wird. In Abschnitt 6.2 ist die umgesetzte Modellbildung für die Stoffauflösung bei Zerkleinerung / Agglomeration dargestellt.

M3: Austrag

Vorwiegend Free Ink wird aus dem System ausgetragen (z.B. Flotation, Sortierung u.a.). Attached Ink wird entsprechend der Rejektrate, d.h. dem Stoffverlust, ausgetragen. Abschnitt 7 beschreibt die Modellierung des Mechanismus 3.

In folgender Abbildung ist der Modellansatz grafisch dargestellt.

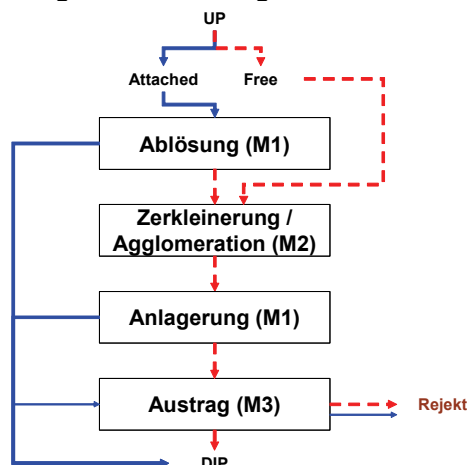


Abb. 1 3-Mechanismenmodell

Durchführung

Im ersten Schritt der Projektarbeiten wurden die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Druckfarbenentfernung identifiziert und bewertet. Nach einer Auswahl und Bewertung geeigneter Messmethoden wurde eine Arbeitshypothese für die Erstellung geeigneter Beschreibungen erstellt.

Nach entsprechenden Literatur- und Datenrecherchen wurden mathematische Modelle erstellt und zu einer Gesamtbeschreibung zur Druckfarbenentfernung zusammengefasst. Dies erfolgte anhand statistischer und phänomenologischer Methoden, getrennt für die beiden Verfahrensstufen Stoffauflösung und Flotation sowie getrennt nach den 3 Mechanismen Druckfarbenablösung/-wiederanlagerung, Druckfarbenzerkleinerung/-agglomeration und Druckfarbenaustrag. Anhand wirtschaftlicher, technologischer und messtechnischer Kriterien konnten damit exemplarisch Optimierungsstrategien erarbeitet werden.

Möglichkeiten zur Übertragung der für die Papierindustrie erarbeiteten Beschreibungen auf andere Industriebranchen wurden durch eine Recherche der Prozessschritte in verschiedenen Industriebranchen und einem Abgleich der Anforderungen hinsichtlich der Entfernung durch Flotation aufgezeigt.

Anwendungsausblick

Mit den erarbeiteten Beschreibungen zur Druckfarbenentfernung können den Betreibern Wege zu einer besseren Beherrschbarkeit der Anlagen eröffnet werden. Hersteller der zugehörigen Anlagentechnik und der Zulieferindustrie (Messtechnik, Additive) können damit den Nutzen ihrer Produkte deutlich erhöhen, indem mit Hilfe der Beschreibungen quantitative Voraussagen des Effektes von Optimierungsmaßnahmen möglich werden.

Die erarbeiteten Modellierungsansätze können von Zulieferern aus dem Bereich der Prozessleittechnik/Regelungstechnik genutzt werden, um softwarebasierte Optimierungen zu erstellen. Diese Umsetzung in die Praxis war nicht Teil des abgeschlossenen Projektes.

5 Einflussfaktoren und deren Messbarkeit

Einflussfaktoren Die Druckfarbenentfernung in einer Deinkinganlage wird vorwiegend von folgenden Faktoren beeinflusst [11, 12, 13, 14]:

Rohstoff- eintrag	Altpapiereigenschaften	Sorte		
		Zusammensetzung		
		Alter		
		Klimatische Einflüsse (Sommereffekt)		
	Druckprodukte	Druckverfahren		
		Eigenschaften der Druckfarbe		
		Zusammensetzung des Papiers		
		Oberflächenbehandlung (z.B. Strich)		
	Chemikalieneinsatz	Tenside (Seife, Sammler)		
		Natronlauge (NaOH)		
		Wasserglas		
		Wasserstoffperoxid		
		Dispergiermittel		
pH-Wert				
Prozess- bedingungen		Aggregat		
		Verweilzeiten, Dauer		
		Temperatur		
		Stoffdichte		
		Energieeintrag		
		Scherbeanspruchung		
		Überlaufverhältnis, Rejektrate		
	Lufteintrag	Verfahren		
		Menge		
		Luftblasengröße Blasengröße		
		Strömungsmechanik		
		Stoff- eigenschaften	Druckfarbenpartikel	Anzahl, Menge und Größenverteilung
				Verhältnis Attached Ink / Free Ink
	Helligkeit des Faserstoffes	Hintergrundweiße		

Vorkommen der Mechanismen in den Prozessstufen in der Papierindustrie

Die umfangreiche Literaturrecherchen und Auswertungen des vorhandenen Datenbestands im Rahmen des Projekts haben eine Zuordnung der physikalischen Mechanismen zu den einzelnen Prozessstufen ermöglicht. In der folgenden Tabelle ist diese Zuordnung in einer Übersicht dargestellt.

Tab. 1 Einfluss der Prozessstufen auf Mechanismen

	Prozessstufe	M1	M2	M3
		Ablösung Anlagerung	Zerkleinerung / Agglomeration	Austrag
	Zerfaserung	+++	+++	
Cleanerung	Schwerschmutzreinigung		+	+
	Cleaner		+	+
Klassierung (Trennung nach Teilchengröße und -form	Lochsartierung		+	+
	Schlitzartierung		+	+
	Fraktionierung		+	+
	Wäsche			+++
Filtration	Entwässerung			++
Flotation	Deinkingflotation	+	++ *	+++
	Mikroflotation	+	++ *	+++
Dispergierung	Disperger	+++	+++	
Bleiche	Bleiche	+	+	

Der Einfluss wurde wie folgt bewertet:

Tab. 2 Bewertung des Einflusses

Klassifizierung	Effekt auf Druckfarbenpartikel
+++	Groß
++	Mittel
+	Gering
*	Bei Zugabe von chemischen Hilfsmitteln kann eine Agglomeration stattfinden.

Recherche und Bewertung der Einflussfaktoren

Anhand der Untersuchungsergebnisse der Forschungsstelle und ausgewählter Literaturdaten wurden die Relevanz der betrachteten Einflussfaktoren qualitativ erfasst [9, 15, 5, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 11, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]. Eine Bewertung der Einflussfaktoren erfolgte getrennt nach Prozessstufen und Mechanismen anhand folgender Klassifizierung:

Tab. 3 Bewertung der Einflussfaktoren

Klassifizierung	Stärke des Einflusses
+++	Groß
++	Mittel
+	Gering
0	Kein Einfluss
	Keine detaillierte Bewertung

Einflussfaktoren Die Wirkung der Einflussfaktoren auf die einzelnen Mechanismen kann wie folgt zusammengefasst werden:

Tab. 4 Übersicht der Einflussfaktoren

Prozess- stufe	Einflussfaktoren	Einheit	M1		M2		M3
			Ablösung	Wideranlagerung	Zerkleinerung	Agglomeration	
Pulper	Altpapier, Sorte		++	+	+		
	Altpapier, Alter		+			+	
	Druckfarbe, Art		++		++		
	Druck, Verfahren		++		++		
	Seife, Art		++	+		++	
	Seife, Einsatzmenge	%	++			++	
	NaOH, Einsatzmenge	%		+			
	pH-Wert			++		++	
	Verweilzeit, Dauer	min		++		++	
	Spez. Energieeintrag			+		++	
	Temperatur	°C		+			+
	Stoffdichte	%		+		+	
	Wasserqualität			+			++
Flotation	Stoffeigenschaft						++
	Druckfarbe, Art						++
	Größenverteilung der Druckfarbenpartikel						+++
	Ölsäure/Seife	%				++	+++
	NaOH	%				++	+++
	Wasserglas	%			++		+++
	Wasserstoffperoxid, H ₂ O ₂	%			0		0
	pH-Wert						++
	Verweilzeit, Dauer	min					+++
	Überlaufverhältnis, R _w						+++
	Temperatur	°C					+
	Stoffdichte	%					++
	Blasengröße						++
	Luft eintrag, Menge						+
Maschinentyp						+	
Wasserhärte	°dH					++	
Disperger	Spez. Energieeintrag		++		++		
	Temperatur		+		++		
	Stoffdichte		+		+		
	Maschinentyp				+		

Messbarkeit

Um diejenigen Parameter auswählen zu können, die hinsichtlich verschiedener Beurteilungskriterien am besten für eine Bestimmung der Einflussfaktoren auf

das Deinkingergebnis und für eine Erstellung von Beschreibungen (Modellbildung) geeignet sind, wurden alle wesentlichen verfügbaren Messmethoden nach folgenden Kriterien bewertet:

Tab. 5 Bewertung der Messmethoden

Kriterium	Klassifizierung		
	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Durchführung	Einfache Vor-Ort-Messung	Messung im Labor	Sehr komplexe Messung
Proben-vorbereitung	Keine	Geringe Proben-aufbereitung notwendig (z.B. Erstellung von Filterblättern)	Sehr komplex
Praxistauglichkeit	Standardverfahren, Norm	PTS Methode	Spezialmethode
Messaufwand	< 10 Minuten	10 – 60 Minuten	> 60 Minuten
Messergebnis	Quantitativ, geringer Messfehler	Quantitativ	Qualitativ

In **Tab. 5** wurde zur Bewertung einzelner Messmethoden nach den fünf Kriterien die in **Tab. 6** farblich dargestellte Klassifizierung (dunkelgrau, mittelgrau und weiß) verwendet.

Die Einflussfaktoren Stoffdichte, pH-Wert, Temperatur, Stoffeigenschaft (HS/ZS) und Wasserhärte können durch standardisierte Messverfahren unter einem geringen Aufwand bei hoher Messgenauigkeit ermittelt werden.

Die Bestimmung der Partikelgröße und der Partikelgrößenverteilung ist ein Verfahren mit hoher Aussagekraft (siehe 36, 19, 37]. Allerdings sollte diese Messmethode aufgrund des hohen Zeitaufwandes und der noch zu geringen Messgenauigkeit optimiert werden.

Mit Hilfe des spezifischen Energieeintrags kann eine grobe Bewertung der auftretenden Scher- und Prallkräfte im Pulper durchgeführt werden.

Für diskontinuierliche Systeme (z.B. Batch Prozess) gilt:

$$Q = (P \cdot t) / m \quad (1)$$

Für kontinuierlichen Systeme (z.B. Trommel) gilt:

$$Q = P / m_s \quad (2)$$

Mit

Q:	spezifischer Energieeintrag	[J/kg]
P:	eingetragene Leistung	[W]
t:	Rührzeit	[s]
m:	Masse	[kg]
m _s :	Massestrom	[kg/s]

Das Überlaufverhältnis kann aus dem Einlauf-Volumenstrom und der Verweilzeit in einer Flotation berechnet werden. Bei einer einstufigen Flotation reicht dazu der Einlauf-Volumenstrom bei konstantem Füllstand aus.

Um das Alter des Altpapiers und die Druckfarbenart zu ermitteln gibt es keine genormten Prüfverfahren. Anhand typischer Verbrauchszyklen und den Angaben auf den Druckmedien lässt sich das Alter abschätzen. Da die Druckfarbenart für die einzelnen Papiersorten und dementsprechend auch für Altpapiersorten typisch ist, können Informationen über die eingesetzten Druckfarbenarten abgeschätzt werden.

Tab. 6 Übersicht der Messmethoden

Parameter	Messmethode	Bewertete Kriterien				
		Durchführung	Proben-vorbereitung	Praxis-tauglichkeit	Mess-aufwand	Mess-ergebnis
Stoffdichte	EN ISO 4119 (DIN 54359)					
	MA30-Moristure-Analyser					
pH-Wert	pH-Meter					
Temperatur	Elektrode					
Nutschenblatt	INGEDE Methode 1					
Membranfilterblatt	INGEDE Methode 3					
Partikelgröße	DOMAS					
Weißgrad	Elrepho					
Hellbezugswert	Elrepho					
Farbort	Elrepho					
K-Wert	Elrepho					
Ligningehalt	Jayme-Knolle-Rapp					
	NIR-Spektroskopie					
Faserlänge	Fiberlab					
	Haindl-McNett					
Asche	DIN 54370-04-1999					
	NIR-Spektroskopie					
Holzstoff/Zellstoff	Chlorzink-Jod-Lösung					
	NIR-Spektroskopie					
Altpapier, Alter	Schätzung					
Druckfarbenart	Schätzung					
Überlaufverhältnis	Berechnung					
Volumenstrom	PLS					
Verweilzeit	Berechnung					
Wasserhärte	Elektrode					
	Potentiometrie					
	Indikatorpapier					
Blasengröße						

Arbeits-hypothese

Auf der Basis der Recherchen und Auswertungen wird deshalb eine Arbeits-hypothese erstellt, bei der folgende wesentliche Einfluss- und Zielgrößen für die Modellerstellung Zerkleinerung und Flotation verwendet werden sollen:

Einflussgrößen (Prozessparameter)	pH-Wert, Chemikalieneinsatz
	Stoffdichte
	Temperatur
	Überlaufverhältnis
	Verweilzeit, Dauer
	Altpapier (Sorte, Holzstoff/Zellstoff)
	Wasserhärte
Zielgrößen	Reflexionsfaktor R_{457} (Weißgrad)
	Reflexionsfaktor R_{700} bei 700 nm
	Schmutzpunkte (1 - 5000 μm in 6 Größenklassen)

6 Beschreibung zur Charakterisierung der Stoffauflösung

6.1 Größenverteilung der Druckfarbenpartikel

Einleitung

Die analysierten Druckfarbenpartikel lassen sich je nach Auswerteverfahren in unterschiedliche Größenklassen einteilen. Im Projekt wurde eine Einteilung nach [19] und eine Auswertung der Druckfarbenpartikelfläche vorgenommen. Dabei weisen undeinkte und flotierte Stoffe sowie Flotate im Durchschnitt ein vergleichbares Größenspektrum auf. In Filtraten dominieren jedoch die kleinen Druckfarbenpartikel (siehe **Abb. 2**).

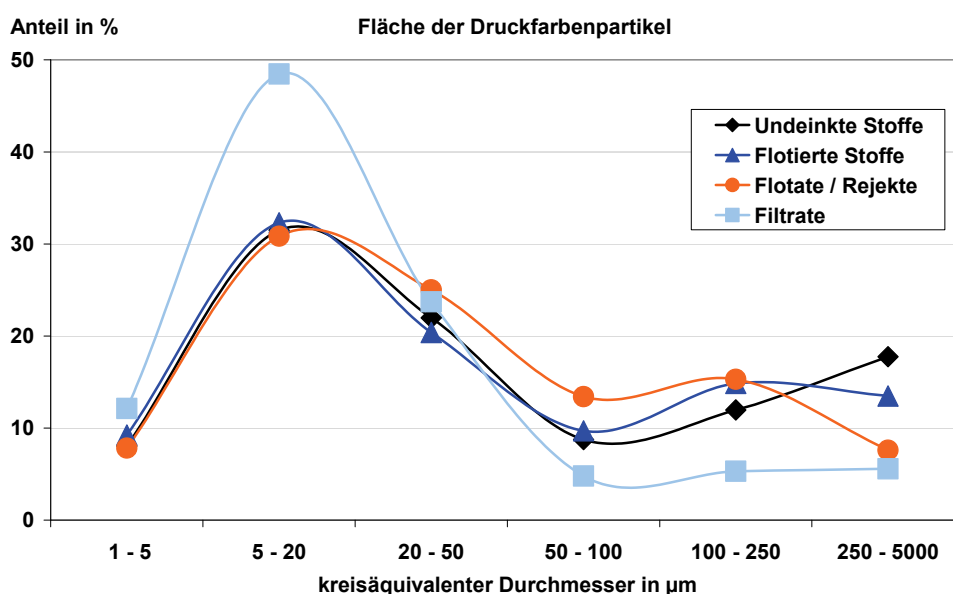


Abb. 2 Durchschnittliche Größenverteilungen unterschiedlicher Stoffklassen, Auswertung der Fläche der Druckfarbenpartikel [19]

Modellierung von Größenverteilungen

Zur Modellierung der Größenverteilung wurden folgende Möglichkeiten betrachtet:

1. Modellierung und Bilanzierung einzelner Größenklassen

Je nach Auswertung und Datengüte sind folgende Unterteilungen möglich:

- a. 6 Größenklassen
- b. 2 Größenklassen KSM (1 – 50 µm) und GSM (50 – 5000 µm)
- c. 1 Größenklasse gesamt (1 – 5000 µm)

In Abschnitt 7 wurden zahlreiche Auswertungen mit diesen Unterteilungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die derzeit verfügbare Messgenauigkeit noch keine sichere Unterteilung in 6 Größenklassen zulässt. Um den Druckfarbenaustrag in der Flotation, der bei einer mittleren Partikelgröße von 20 – 150 µm am höchsten ist, abbilden zu können, sollte deshalb das

nachfolgende Verfahren zur Auswertung gewählt werden.

2. Modellierung und Bilanzierung von Normalverteilungen

Bei diesem Verfahren wird aus den verfügbaren Daten eine Normalverteilung mit Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Dadurch wird die Größenverteilung gekennzeichnet. Die Gesamtfläche unter der Normalverteilungskurve entspricht dann der Menge der Druckfarbenpartikel (mm^2/g). Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden folgende Normalverteilungen berücksichtigt.

- a. Log-Normalverteilung
- b. Normalverteilung

Für die Untersuchungen mit der Log-Normalverteilung wurden folgende Größenklassen betrachtet:

- a. 2 Größenklassen KSM (1 – 50 μm) und GSM (50 – 5000 μm)
- b. 1 Größenklasse gesamt (1 – 5000 μm)

Bewertung der Modellierung anhand Log-Normalverteilung

Die Auswertungen an den Messwerten von undeinkten Stoffen ergab, dass mit den berechneten Werten einer Log-Normalverteilung die gemessene Größenverteilung sehr gut beschreiben werden kann. Dies kann mit Hilfe der akkumulierten Häufigkeitsverteilung in **Abb. 3** sehr gut gezeigt werden.

Der kreisäquivalente Durchmesser ist eine positive (Zufalls-)Größe und somit einseitig verteilt. Damit konnten zur Beschreibung derartiger Verteilungen und insbesondere im Zusammenhang mit Wachstums- und Teilungsprozessen die Ergebnisse aus [38] bestätigt werden.

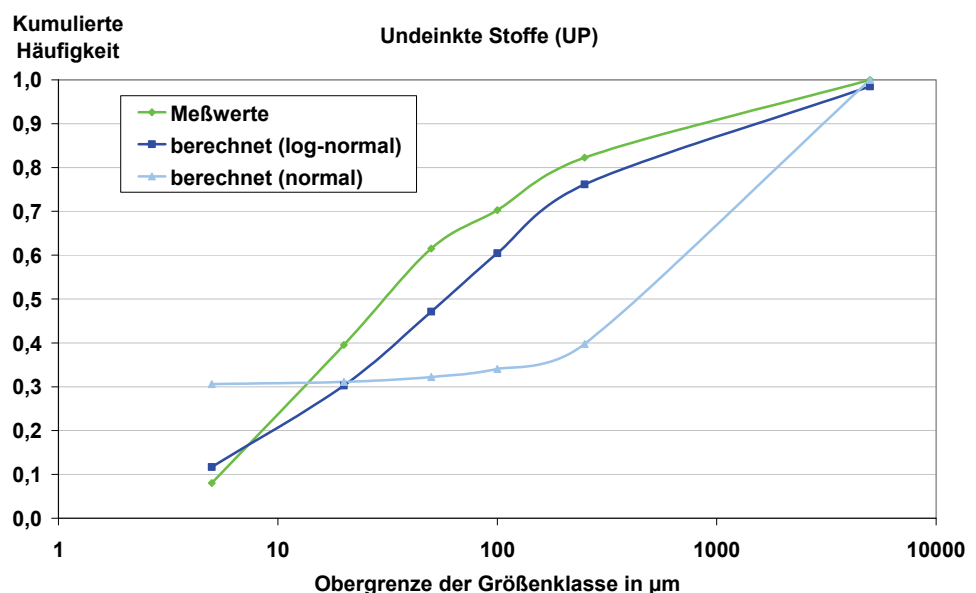


Abb. 3 Berechnete und gemessene Größenverteilungen undeinkter Stoffe

Fazit

Mit einer Log-Normalverteilung kann die Größenverteilung der Druckfarbenpartikel anhand von 3 Werten (Masse, Erwartungswert der zugehörigen Normalverteilung und Streuung der zugehörigen Normalverteilung) sehr gut beschrieben werden. Mit der derzeitigen Beschränkung auf 6, 12 bzw. 17 Größenklassen kann bereits eine zufriedenstellende Modellgüte erreicht werden.

Damit die Größenverteilung anhand einer Log-Normalverteilung mit einer besseren Güte beschrieben werden kann, ist anstatt der Messdatenausgabe in Größenklassen eine Ausgabe aller einzelnen Messdaten anzustreben. Dabei sollte die resultierende Häufigkeitsverteilung durch eine Summe von 2 Log-Normalverteilungen nach folgender Gleichung approximiert werden [39, 40]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^2 \gamma_i * \frac{1}{x * \sqrt{2 * \pi * \sigma_i^2}} * e^{-\frac{(\ln x - \mu_i)^2}{2 * \sigma_i^2}} \tag{3}$$

6.2 Mechanismus Druckfarbenzerkleinerung / -agglomeration

Druckfarbenpartikel im Altpapier

In der Stoffauflösung werden die eingebrachten Druckfarbenpartikel je nach Prozessbedingungen und Chemikalieneinsatz zerkleinert und agglomert. Umfangreiche Recherchen in PTS internen und externen Datenbeständen haben gezeigt, dass aufgrund noch fehlender Messtechnik die Menge an Druckfarbenpartikeln und deren Größenverteilung im Altpapier messtechnisch noch nicht bestimmbar ist.

Lediglich auf Basis der Einsatzmengen lässt sich für Deinkingware ein durchschnittlicher Druckfarbenverbrauch von 20 kg/t Papier berechnen [41]. Wenn man berücksichtigt, dass je nach Druckverfahren ein Teil der Druckfarbenbestandteile (Mineralöl bzw. Lösemittel) durch Wegschlagen oder Trocknung entfernt wird, stimmt dieser Wert sehr gut mit Werten überein, die im Rahmen eines Forschungsprojekts anhand der DOMAS Druckfarbenpartikelmessung nach der Zerkleinerung ermittelt werden konnten [20].

Tab. 7 Druckfarbenmenge im Altpapier [20]

AP-Sorte		Druckfarbenmenge in kg/t _{Papier}
1.11	Deinkingware	13 – 16
2.03	Holzhaltige weiße Späne mit leichtem Andruck	2 – 8
2.05	Sortiertes Büroaltpapier	5 – 13
3.04	Holzfremde weiße Späne mit leichtem Andruck	1,8 – 2,8

Datenbasis

Zur Entwicklung einer Beschreibung für die Zerkleinerung und Agglomeration in der Stoffauflösung wurde ein Datensatz verwendet, bei dem die Zerkleinerungsbedingungen Temperatur, Dauer sowie Seifen- und Natronlaugekonzentration variiert wurden [9]. Die analytischen Bestimmungen erfolgten am aufgelösten, undeinkten Stoff (UP).

Modellierung der Druckfarbenpartikel

Zur Charakterisierung der Größenverteilung wurden die Messwerte der Größenklassen in eine Log-Normalverteilung umgerechnet. Damit sind μ und σ der Größenverteilung die Zielgrößen bei der Modellerstellung. Daraus werden bei den Modellrechnungen dann Erwartungswert und Streuung berechnet. Die Menge der Druckfarbenpartikel wird bei der Zerfaserung nicht verändert und bleibt deshalb konstant.

Modellerstellung mit Cornerstone

Mit Cornerstone wurden verschiedene Modellansätze zur mathematischen Beschreibung zwischen Einfluss- und Zielgrößen getestet (**Tab. 8**).

Zur Bewertung der Modellgüte wird vor allem $RMSE^1$ verwendet. Dieser Wert sollte möglichst klein sein. Ein weiteres Gütekriterium ist R^2 oder auch Bestimmtheitsmaß genannt, das aus simulierten und gemessenen Outputwerten mit den Standardwerkzeugen Excel und Cornerstone ermittelt wurde. Dieser normierte Wert sollte möglichst hoch sein und kann maximal 1 betragen.

Tab. 8 Modellerstellung Zerkleinerung und Agglomeration in der Stoffauflösung

Modellansätze	Linear	
	Quadratisch	
	Kubisch	
	Interaktionen	
Einflussgrößen	T	Temperatur
	t	Dauer
	C_{Seife}	Konzentration an Seife
	C_{NaOH}	Konzentration an Natronlauge
Zielgrößen	μ	Mittelwert der Lognormalverteilung (MWLN)
	Σ	Standardabweichung der Lognormalverteilung (SLN)
Größenverteilung	Gesamt	1 – 5000 μm
	KSM	1 – 50 μm
	GSM	50 – 5000 μm

Damit konnten Modellgleichungen zur Beschreibung der Zerkleinerung und Agglomeration in der Stoffauflösung entwickelt werden.

¹ Zur Bewertung von Modellen, insbesondere zur Bewertung der Güte der berechneten Trennkurven nach Nelson (Screening Koeffizient) wurde der mittlere Kalibrierfehler RMSE nach folgender Gleichung berechnet:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

Mit \hat{y}_i = simulierte Outputwerte (Trennraten E_R),
 y_i = gemessene Outputwerte (E_R)

Modellgüte

Zusammenfassend wird die Modellgüte der aufgezeigten Modelle in folgender Tabelle dargestellt:

Tab. 9 Modelle zur Beschreibung der Zerkleinerung und Agglomeration in der Stoffauflösung

Größenverteilung		R ²	RMSE
Gesamt (1 – 5000 µm)	Linear	0	0,29
	Quadratisch	0,39	0,25
	Interaktionen	0	0,29
	Kubisch	0,39	0,25
KSM (1 – 50 µm)	Linear	0,16	0,06
	Quadratisch	0,81	0,04
	Kubisch	0,81	0,04
GSM (50 – 5000 µm)	Linear	0	0,12
	Quadratisch	0,58	0,09
	Kubisch	0,58	0,09

Modellverhalten

Bei der Modellierung der gesamten Größenverteilung 1 – 5000 µm fällt auf, dass alle untersuchten Modelltypen eine vergleichbare Modellgüte RMSE aufweisen. Da jedoch nur bei quadratischer Modellbildung der Zerkleinerungseffekt mit steigender Zerfaserungsdauer abgebildet werden kann, ist dieses Modell für die Stoffauflösung sinnvoll (**Abb. 4**).

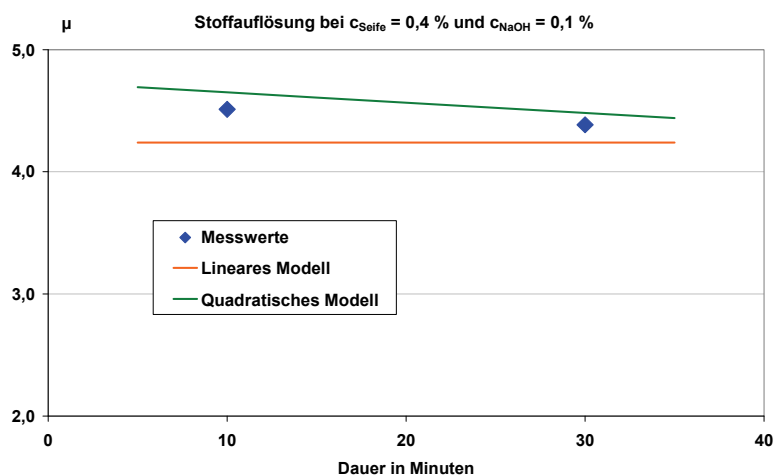


Abb. 4 Modellverhalten für die gesamte Größenverteilung

Die Untersuchungen ergaben, dass ein Modell, bestehend aus je einer Log-Normalverteilung für KSM und GSM bessere Resultate als das Modell für die gesamte Größenverteilung lieferte. Hier kann mit dem resultierenden Modell auch die Dosierung der Seife korrekt abgebildet werden, da mit der Zugabe der Seife eine Agglomeration und somit eine Vergrößerung der mittleren Druckfarbenpartikelgröße stattfindet (**Abb. 5**).

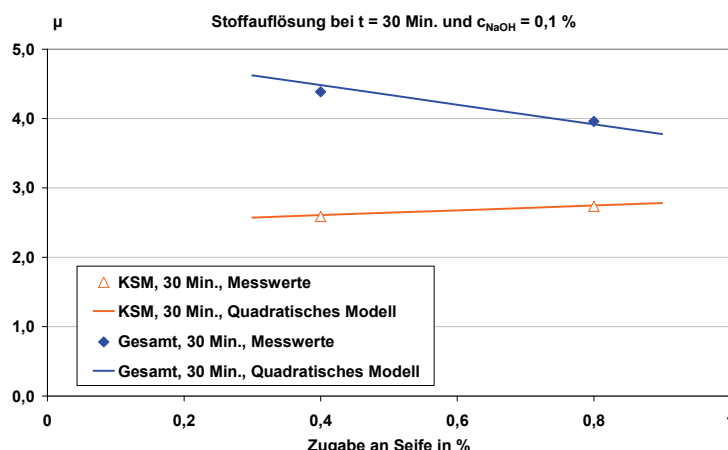


Abb. 5 Modellverhalten für die gesamte Größenverteilung und KSM

Fazit

Mit einem quadratischen Modell können die Einflussgrößen Temperatur, Dauer sowie Zugabe an Seife und Natronlauge für die Stoffauflösung gut beschrieben werden. Wird für die kleinen und großen Druckfarbenpartikel jeweils eine Größenverteilung verwendet, verbessert sich die Modellgüte.

6.3 Mechanismus Druckfarbenablösung / -wiederanlagerung

Einleitung

Zur Modellerstellung und –überprüfung wurden bilanzierbare Daten verwendet. Dies sind Fasern, Asche und Druckfarbenpartikel. Optische Eigenschaften wie Weißgrad, k-Wert und Helligkeit sind hingegen integrale Größen, die nicht bilanzierbar sind. Der daraus abgeleitete Wert Ink Detachment (ID) ist deshalb für die Modellerstellung nicht nutzbar.

Modellierung der Druckfarbenpartikel

Da zur Modellierung eine bilanzierbare Größe benötigt wurde, wurde ein Ink Detachment Faktor F_{ID} neu eingeführt. Die dafür notwendigen Größen werden anhand einer schlüssigen Stoff-Wasser-Bilanz (siehe Anhang) berechnet. Damit kann analog zum Nelson Koeffizient die Leistungsfähigkeit bei der Ablösung bzw. bei Mechanismus 1 beschrieben werden.

$$F_{ID} = \frac{S_{Free}}{S_I} = \frac{S_{Free}}{S_{UP}} \quad (4)$$

Zur Charakterisierung und Modellierung der Größenverteilung wurden wie bei Mechanismus 2 (Ablösung / -wiederanlagerung) die analysierten Größenklassen in eine Log-Normalverteilung umgerechnet. Um die Veränderungen der Größenverteilung bei Mechanismus 1 modellieren und beschreiben zu können, sind neben dem Faktor F_{ID} auch entsprechende Faktoren für μ und σ zu berücksichtigen.

$$F_{\mu} = \frac{\mu_{A1}}{\mu_I} = \frac{\mu_{Free}}{\mu_{UP}} \quad (5)$$

$$F_{\sigma} = \frac{\sigma_{A1}}{\sigma_I} = \frac{\sigma_{Free}}{\sigma_{UP}} \quad (6)$$

Modellerstellung mit Cornerstone

Für die Modellierung der Ablösung in der Stoffaufbereitung wurden verschiedene Ansätze zur mathematischen Beschreibung zwischen Einfluss- und Zielgrößen getestet:

Tab. 10 Modellerstellung Ablösung in der Stoffauflösung

Modellansätze	Linear	
	Quadratisch	
	Kubisch	
	Interaktionen	
Einflussgrößen	T	Temperatur
	t	Dauer
	C_{Seife}	Konzentration an Seife
	C_{NaOH}	Konzentration an Natronlauge
Zielgrößen	F_{ID}	Ink Detachment Faktor
	F_{μ}	Faktor für Erwartungswert μ der Normalverteilung
	F_{σ}	Faktor für Streuung σ der Normalverteilung
Größenverteilung	Gesamt	1 – 5000 μm
	KSM	1 – 50 μm
	GSM	50 – 5000 μm

Auswertungen an den Log-Normalverteilungen der Größenklassen haben gezeigt, dass die Streuung σ unabhängig von den Einflussgrößen und konstant ist. Damit wird mit $F_{\sigma} = 1$ beim Mechanismus 1 modelliert.

Damit konnten Modellgleichungen zur Beschreibung der Ablösung in der Stoffauflösung entwickelt werden:

Modellgüte

Zusammenfassend wird die Modellgüte der aufgezeigten Modelle in folgender Tabelle dargestellt:

Tab. 11 Modelle zur Beschreibung der Ablösung in der Stoffauflösung

Größenverteilung	Modelltyp	F_{ID}		F_{μ}	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
Gesamt (1 – 5000 μm)	Linear	0,35	0,15	0,18	0,17
	Quadratisch	0,79	0,1	0,18	0,17
	Interaktionen	0,6	0,12	0,18	0,17
	Kubisch	0,99	0,03	0,98	0,05
KSM (1 – 50 μm)	Linear	0	0,34	0,24	0,08
	Quadratisch	0,59	0,26	0,39	0,07
	Interaktionen	0,45	0,28	0,24	0,08
	Kubisch	0,99	0,06	0,8	0,05
GSM (50 – 5000 μm)	Linear	0,63	0,1	0,53	0,19
	Quadratisch	0,75	0,09	0,53	0,19
	Interaktionen	0,75	0,09	0,53	0,19
	Kubisch	0,93	0,07	0,99	0,06

Modellverhalten

Mit dem erstellten Modell kann die verstärkte Druckfarbenablösung mit steigen-

der Zerfaserungsdauer sehr gut abgebildet werden (**Abb. 6**).

In **Abb. 7** ist sehr gut zu sehen, dass die abgelösten freien Druckfarbenpartikel eine geringere mittlere Partikelgröße, dargestellt in μ , als der undeinkte Gesamtstoff aufweisen ($F_{\mu} < 1$). Mit steigender Auflösedauer agglomerieren die kleinen Partikel zu größeren, so dass F_{μ} ansteigt.

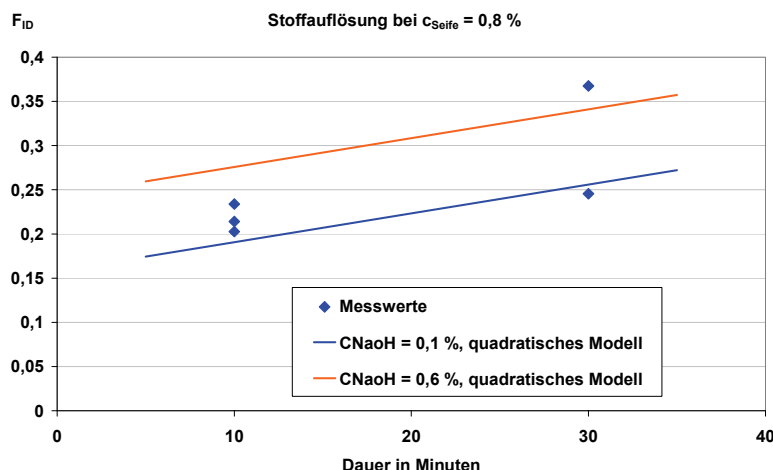


Abb. 6 Modellverhalten zur Beschreibung von F_{ID} für die gesamte Größenverteilung

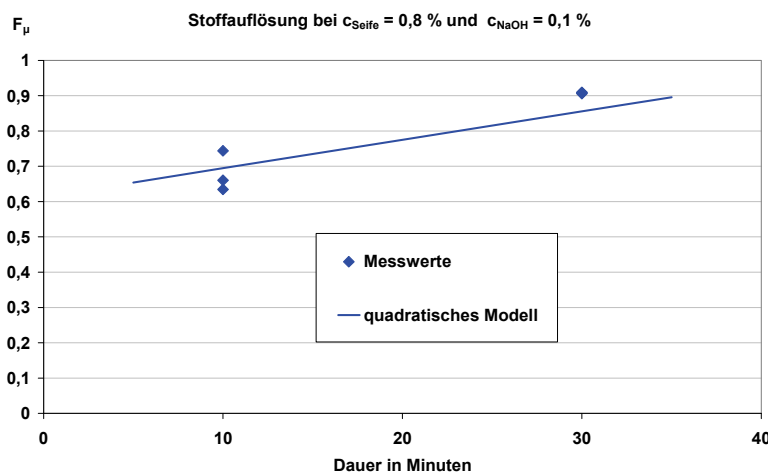


Abb. 7 Modellverhalten zur Beschreibung von F_{μ} für die gesamte Größenverteilung

Fazit

Mit quadratischen Modellen können die Einflussgrößen Temperatur, Dauer sowie Zugabe an Seife und Natronlauge für die Ablösung in der Stoffauflösung gut beschrieben werden. Werden für die kleinen und großen Druckfarbenpartikel jeweils eigene Größenverteilungen verwendet, verbessert sich nur die Modellgüte für F_{μ} , also die Veränderung der mittleren Partikelgröße durch die Ablösung. Für F_{ID} ist keine Verbesserung möglich.

7 Beschreibung zur Charakterisierung der Flotation, Mechanismus Druckfarbenaustrag

7.1 Modellierungsansätze

Recherche	<p>Es wurden umfangreiche Literatur-Recherchen über verfügbare Modellierungsansätze zur Druckfarbenentfernung durchgeführt. Allen Ansätzen waren folgende 2 wesentlichen Punkte gemeinsam:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keine separaten Modellierungen der Mechanismen 1 und 2 Die Ablösung bzw. Zerkleinerung der Druckfarbenpartikel wurde nur als Nebenbedingung oder als zusätzliche Einflussgröße bei den recherchierten Modellierungen berücksichtigt. • Modellierung von integralen optischen Eigenschaften In den recherchierten Modellansätzen werden in der Regel auf der Basis ausgewählter Einflussgrößen durch datenbasierte Modellbildung integrale optische Eigenschaften, wie z.B. Weißgrad, Eric-Wert oder K_{700}-Wert in Fertigstoffen berechnet. Ein mehrstufiges Vorgehen, bei dem zuerst die Verteilung der Druckfarbenpartikel auf Basis ausgewählter Einflussgrößen und dann daraus integrale optische Eigenschaften, wie z.B. Weißgrad berechnet werden, ist in keinem Modellansatz zu finden. Dadurch können in diesen Modellansätzen nur ausgewählte Prozessschritte bei den Berechnungen berücksichtigt werden.
Modelltypen	<p>Die verfügbaren Modellansätze können in folgende Kategorien zusammengefasst werden:</p> <p>Beschreibung der Flotationskinetik</p> <p>Hier werden sehr komplexe Modellansätze beschrieben, mit denen man versucht, die Wechselwirkungen zwischen Druckfarbenpartikel und der Strömungskinetik innerhalb einer Flotationszelle sehr genau zu beschreiben. Dabei wird vor allem auf Einfluss- und Messgrößen zurückgegriffen, die nur schwer erfassbar sind. Dazu zählen u.a. Blasengrößen, Oberflächenspannungen, Kontaktwinkel. Eine Realisierung der Modellierung erfolgt oft mittels CFD-Modellen [8, 42, 43, 44].</p> <p>Blockmodelle</p> <p>Der Prozess der Druckfarbenentfernung kann in verschiedene Unterprozesse unterteilt werden. Für jeden Unterprozess werden in der Regel datenbasierte Modellierungen auf Basis ausgewählter Einflussgrößen erstellt. So werden verschiedene Modelle zur Anlagerung, zum Kontakt, zur Stabilisierung, zum Flotationsschaum und zum Transport beschrieben. Auch hier wird teilweise auf schwer zugängliche Messgrößen zurückgegriffen [15, 45, 46, 16, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56].</p> <p>Bilanzmodelle</p> <p>Darüber hinaus gibt es zahlreiche Bilanzmodelle, bei denen wesentliche Stoffgrößen modelliert werden. Dabei werden in der Regel messtechnisch gut erfassbare Einflussgrößen, aber keine Größenverteilungen an Druckfarbenpartikeln berücksichtigt [57, 58, 59, 60, 61, 62].</p>

7.2 Untersuchungen zur Übertragbarkeit des Mixed Flow Modells

Einleitung

Zur Modellierung von Sortierprozessen hat sich für Faserfraktionen, Asche und Stickies das Mixed Flow Modell bewährt [63, 64, 65]. Anhand der an der PTS verfügbaren Daten [20] wurde überprüft, ob das Mixed Flow Modell von Sortieraggregaten auf Flotationszellen übertragbar ist. Darüber hinaus war zu prüfen, ob auch Schmutzpunkte und deren Größenverteilung mit diesem Modellansatz hinlänglich genau abgebildet werden können.

Zur Modellerstellung und –überprüfung können nur bilanzierbare Daten verwendet werden. Um die dazu notwendigen Werte für Q , β und E_R berechnen zu können, sind die Konzentrationen an Attached Ink, Free Ink und Total Ink in Input, Akzept und Rejekt (Flotat) anhand einer Stoff-Wasser-Bilanz zu bestimmen (siehe auch [37]).

Durchführung

Zur Überprüfung des Mixed Flow Modellansatzes wurden nach Gleichung (7) anhand der gemessenen Rejekt- und Trennraten Screening Koeffizienten berechnet. Getrennt nach Einstellgrößen und Größenklassen wurden diese Screening Koeffizienten zu durchschnittlichen Screening Koeffizienten gemittelt und für den Mittelwert ein Variationskoeffizient (VK) berechnet. In den nachfolgenden R_w - E_R -Abbildungen wurden mit Hilfe der durchschnittlichen Screening Koeffizienten die Trennkurven getrennt nach Einstellgrößen und Größenklassen erstellt. Darüber hinaus wurden in den Abbildungen die Einzelmessungen eingetragen, aus denen die durchschnittlichen Trennkurven gebildet wurden.

$$E_{R,i} = \frac{R_w}{R_w + \frac{P_i}{P} - \frac{P_i}{P} * R_w} = \frac{R_w}{1 - Q_i(1 - R_w)} = \frac{R_w}{1 - Q_i + Q_i R_w} \quad (7)$$

Am Beispiel Deinkingware (DW) und Total Ink (Summe aus Attached und Free Ink) soll das grundsätzliche Vorgehen ausführlich gezeigt werden.

Trennraten für Fasern und Asche

Um die Güte der Modelle für Schmutzpunkte besser einschätzen zu können wurden im ersten Schritt R_w - E_R -Abbildungen für Fasern und Asche erstellt. Die grundsätzliche Gültigkeit des Mixed Flow Ansatzes für Fasern und Asche wurde bereits in [65] bestätigt. **Abb. 8** zeigt die berechneten Trennkurven im Vergleich zu den einzelnen Messpunkten.

Die R_w - E_R -Abbildungen sind folgendermaßen zu interpretieren. Messpunkte oberhalb der Winkelhalbierenden bedeuten eine Anreicherung im Rejektstrom, unterhalb der Winkelhalbierenden eine Anreicherung im Akzeptstrom. Je weiter die Kurven von der Winkelhalbierenden entfernt sind, umso besser ist die Abtrennung.

Die Kurvenverläufe zeigen sehr deutlich, dass Asche im Rejekt, d.h. dem Flotat der Deinkingflotation angereichert wird. Die Fasern verbleiben erwartungsgemäß vorwiegend im Akzept.

Bei allen 4 Altpapiersorten wurden vergleichbare Screening Koeffizienten für Asche und Fasern bei den einzelnen Laborversuchen erzielt. Nur die Fasern unterscheiden sich bei Büropapier (BP) mit $Q = -0,7$ etwas von den restlichen Altpapiersorten. Hier ist die Abweichung der Einzeldaten vom Mittelwert am größten (Variationskoeffizient = 31.46 %).

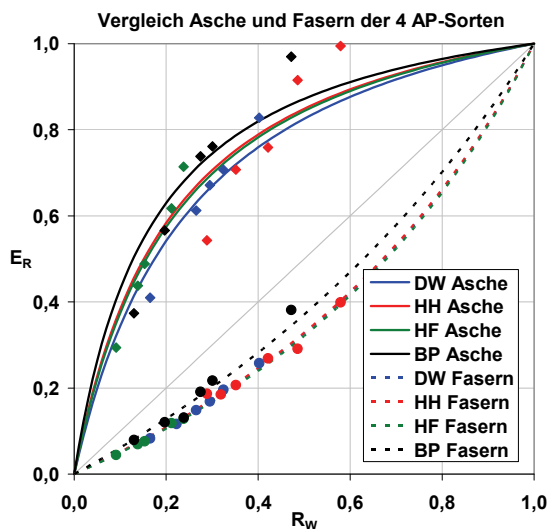


Abb. 8 R_W - E_R -Diagramm für Asche und Fasern

Die Güteparameter RMSE und R^2 bestätigen eine sehr gute Modellgüte für Fasern. Bei Asche weichen, insbesondere bei höheren Rejektraten, die gemessenen Trennraten etwas stärker von der Nelson-Kurve ab. Eine Auswertung nach dem Plug Flow Modell ergab keine besseren Modelle.

Trennraten für Druckfarbenpartikel bei Einsatz von Deinkingware (DW)

Im nächsten Schritt wurden die berechneten Trennkurven im Vergleich zu den Messdaten für die Druckfarbenpartikel dargestellt. Die nächste Abbildung zeigt alle Größenklassen im Vergleich (siehe auch [37] für weitere AP-Sorten):

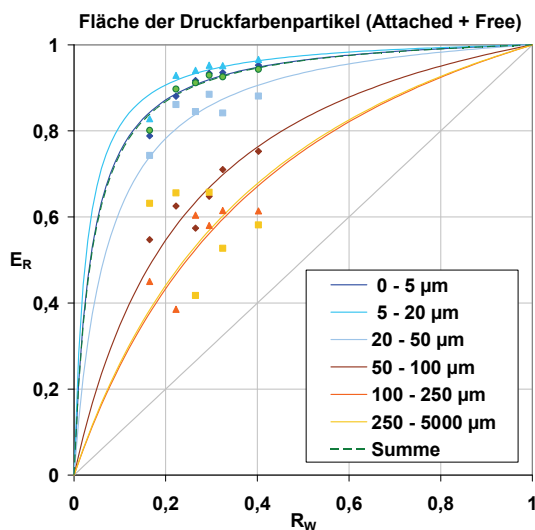


Abb. 9 R_W - E_R -Diagramm für alle Schmutzpunktklassen bei DW

Die Darstellung zeigt, dass wie in der Literatur angegeben sehr kleine Druckfarbenpartikel $< 5 \mu\text{m}$ weniger gut als kleine und mittelgroße Druckfarbenpartikel $5 - 50 \mu\text{m}$ bei der Flotation ausgetragen werden.

Die folgende Darstellung zeigt sehr deutlich, dass Faserstoffe zum größten Teil im Akzept verbleiben. Große Druckfarbenpartikel $> 50 \mu\text{m}$ werden in der Flotation weniger gut ausgetragen als die Asche.

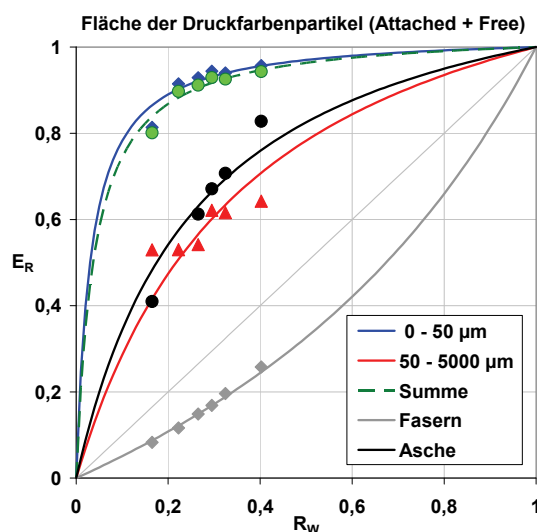


Abb. 10 R_W - E_R -Diagramm für Asche, Fasern und Druckfarbenpartikel bei DW

7.3 Zusammenfassende Ergebnisse für Modellauswahl sowie den Inputgrößen Rejektrate (Überlaufverhältnis) und Altpapiereinsatz

Einleitung

Bei den bisherigen Auswertungen wurde überprüft, ob für die Einflussgröße Rejektrate (dies entspricht bei der Deinkingflotation dem Überlaufverhältnis) Modellvorstellungen von Sortieraggregaten auf Flotationszellen übertragbar ist. Außerdem wurde die Abhängigkeit der Trennraten von einer weiteren Einflussgröße, dem Altpapiereinsatz, untersucht.

Modellbewertung für DW

Für alle ausgewerteten Messparameter ist festzustellen, dass das Mixed Flow Modell eine bessere Modellgüte als das Plug Flow Modell aufweist. Aufgrund der höheren Messgenauigkeit ist für Fasern und Asche in jedem Fall eine bessere Modellgüte als für Druckfarbenpartikel feststellbar.

Darüber hinaus nimmt die Modellgüte mit zunehmender Partikelgröße ab, da mit zunehmender Partikelgröße die analysierte Anzahl und Fläche an Druckfarbenpartikel und somit auch die Messgenauigkeit abnimmt.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass eine Betrachtung der freien Druckfarbenpartikel immer bessere Trenneffizienzen ergibt als eine Betrachtung der gesamten Druckfarbenpartikel (Total Ink).

Modellbewertung für HH

Aufgrund der geringen Konzentration großer Druckfarbenpartikel konnten bei den Auswertungen für Holzhaltige Papiere keine schlüssigen Stoff-Wasser-Bilanzen erstellt werden (es wurden im Rejekt meistens negative Konzentrationen berechnet). Dadurch war eine Auswertung von GSM nicht möglich.

Eine unzureichend genaue Bestimmung der großen Schmutzpunkte führte dazu, dass bei diesem Datensatz nicht nur die großen Schmutzpunkte sondern auch die Gesamtmenge an Schmutzpunkten (Summe) nicht auswertbar war. Lediglich KSM (1 – 50 µm) und die kleinen Größenklassen waren gut darstell-

bar.

Hier ist noch viel deutlicher die bessere Modellgüte beim Mixed Flow Ansatz zu erkennen. Die auswertbaren Parameter und Größenklassen zeigen ansonsten eine gute bis sehr gute Modellgüte.

Die Modelle zeigen eine vergleichbare Asche- und Fasertrennung wie bei Deinkingware DW. Die Abtrennung der Druckfarbenpartikel ist jedoch schlechter als bei DW, d.h. es verbleiben mehr Druckfarbenpartikel im Gutstoff. Analog zu DW werden für Free Ink größere Trennraten als bei Total Ink beobachtet, d.h. es werden vor allem freie Druckfarbenpartikel ausgetragen. Aufgrund der niedrigeren Konzentration an großen Druckfarbenpartikeln ist der Unterschied jedoch sehr gering.

Modellbewertung für HF

Für Druckfarbenpartikel 250 – 5000 µm lagen keine Messdaten vor. Diese Größenklasse konnte deshalb nicht ausgewertet werden.

Nur das Mixed Flow Modell ergab bei dieser Altpapiersorte eine brauchbare Modellgüte, die jedoch schlechter als bei anderen Altpapiersorten ausfiel.

Im Modell zeigt werden wie bei den anderen Altpapiersorten sehr kleine Druckfarbenpartikel < 5 µm am schlechtesten ausgetragen. Damit wird die Praxis sehr gut wiedergegeben.

Modellbewertung für BP

Sehr kleine Druckfarbenpartikel < 5 µm werden am schlechtesten ausgetragen. Die Schwankungsbreite ist jedoch höher als bei den anderen Altpapiersorten. Wie bei holzfreien Papieren werden große Druckfarbenpartikel besser als die kleinen abgetrennt.

Wie bei holzfreien Papieren führt eine unzureichend genaue Bestimmung der großen Schmutzpunkte dazu, dass bei diesem Datensatz nicht nur die großen Schmutzpunkte sondern auch die Gesamtmenge an Schmutzpunkten (Summe) nicht auswertbar ist. Lediglich KSM (0 – 50 µm) und die kleinen Größenklassen sind gut darstellbar.

Zusammenfassung aller ausgewerteten Q-Werte

Eine Zusammenfassung aller ermittelten Kennwerte ergab folgende Trends:

- Q liegt für Total Ink im Mittel bei $0,95 \pm 0,03$ (Ausnahme: Holzhaltige Papiere 0,85)
 - $Q_{KSM} = Q_{Gesamt}$
 - Jede Altpapiersorte weist eine unterschiedliche Verteilung über die Größenklassen auf
 - Free Ink hat eine bessere Trenneffizienz als Total Ink, die Verteilung über die Größenklassen ist jedoch vergleichbar
-

Modellvalidierung

Anhand unterschiedlicher Datensätze konnte das Modell für die Altpapiersorte Deinkingware validiert werden [66]. Dabei wurden nur die kleinen Druckfarbenpartikel 1 – 50 µm und Total Ink betrachtet. Legt man nun die oben genannten Daten als Kalibrierdaten zugrunde, so kann für Stoff 1 zur Bewertung der Modellgüte mit RMSEV (mittlerer Prognosefehler nach Gleichung (8)) von 0,07 eine noch gute Modellübereinstimmung festgestellt werden. Für Stoff 2 konnte ein RMSEV von 0,16 ermittelt werden. Darüber hinaus besteht auch eine gute

Modellübereinstimmung zwischen PTS und Körkkö [67].

$$RMSEV = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (8)$$

Mit \hat{y}_i = simulierte Outputwerte (Trennraten ER),
 y_i = gemessene Outputwerte (Trennraten ER) des neuen Datensatzes

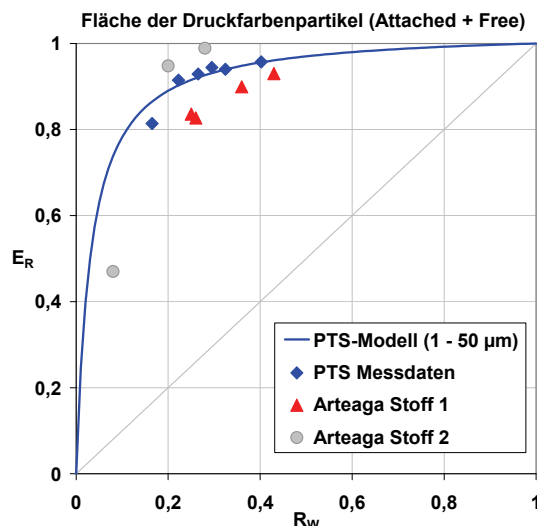


Abb. 11 R_W - E_R -Diagramm für Deinkingware, Total Ink und kleinen Druckfarbenpartikel 1 – 50 µm (PTS-Modell im Vergleich zu Daten von Arteaga) [66]

7.4 Modellierung der Größenverteilung

Einleitung

Mit dem Nelson-Koeffizienten kann der Austrag an Druckfarbenpartikel in einer Flotation sehr gut modelliert werden. Aufgrund der derzeit verfügbaren Messgenauigkeit sollten damit nur die Gesamtmenge an Druckfarbenpartikel berechnet werden.

Um die Größenverteilung zu modellieren werden analog zur Ablösung die Größenklassen in eine Log-Normalverteilung umgerechnet. Damit können bei Mechanismus 3 neben E auch μ und σ wie folgt modelliert werden:

$$F_\mu = \frac{\mu_A}{\mu_I} = \frac{\mu_{DIP}}{\mu_{UP}} \quad (9)$$

$$F_\sigma = \frac{\sigma_A}{\sigma_I} = \frac{\sigma_{DIP}}{\sigma_{UP}} \quad (10)$$

Mit

F_μ : Änderung der mittleren Partikelgröße

F_σ : Änderung der Streuung der Partikelgrößenverteilung

Modellerstellung und Modellver-

Die Auswertungen zeigten, dass bei Deinkingware mit steigender Rejektate eine deutliche Zunahme der mittleren Partikelgröße eintritt.

halten

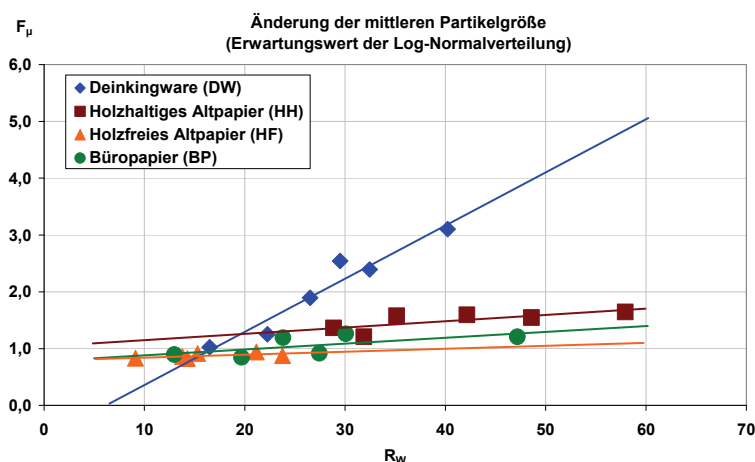


Abb. 12 Änderung der mittleren Partikelgröße (Darstellung als Änderung des Erwartungswerts der Log-Normalverteilung)

Bei anderen untersuchten Altpapiersorten ist eine deutlich geringere Zunahme der Partikelgröße festzustellen.

Durch eine Flotation wird nicht nur die mittlere Partikelgröße beeinflusst, sondern auch die Streuung der Partikelgrößenverteilung. Die Veränderung dieser Streuung F_{σ} ist in folgender Abbildung dargestellt.

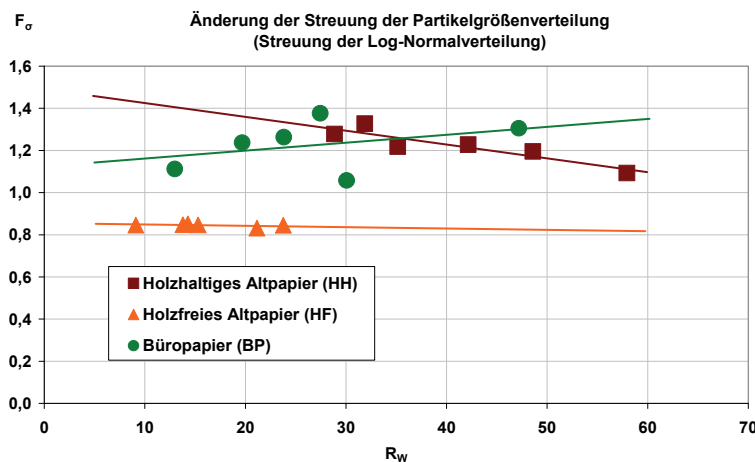


Abb. 13 Änderung der Streuung der Partikelgrößenverteilung (Darstellung als Änderung des Streuung der Log-Normalverteilung)

Mit der Flotationsdauer wird diese Streuung nicht verändert. Für die einzelnen Altpapiersorten können somit folgende mittleren Werte angegeben werden:

Tab. 12 Änderung der Streuung der Partikelgrößenverteilung

	F_{σ}
Deinkingware	2,0
Holzhaltige Altpapiere	1,2
Holzfreie Altpapiere	0,85
Büropapiere	1,2

Modellgüte

Damit konnten Modellgleichungen zur Beschreibung der Änderung der mittleren Partikelgröße in der Flotation entwickelt werden. Zusammenfassend kann die Modellgüte der aufgezeigten Modelle in folgender Tabelle zusammengefasst werden:

Tab. 13 Modelle zur Beschreibung der Änderung der Partikelgrößenverteilung in der Flotation

Altpapiersorte	Modelltyp	F_{μ}		F_{σ}	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
Deinkingware	Linear	0,94	0,23	0,0	0,85
Holzhaltige Altpapiere	Linear	0,53	0,13	0,83	0,04
Holzfremde Altpapiere	Linear	0,36	0,05	0,25	0,01
Büropapiere	Linear	0,42	0,19	0,13	0,12

8 Übertragung auf andere Industriebranchen

8.1 Industriebranchen

Recherche nach Industriebranchen

Zur Übertragung der erarbeiteten Beschreibung auf andere Industriebranchen konnten im Rahmen des Projektes folgende Branchen berücksichtigt werden:

Tab. 14 Recherchierte Industriebranchen

Industriebranchen	Quellen	
Mineralstoffe	Eigenschaftsrohstoffe	68; 69; 70; 71; 72; 73, 74
	Energierohstoffe	69; 75; 76; 77; 78
	Elementrohstoffe	69;
Leder- und Textilindustrie	Textilproduktion	79
	Färbereien	80, 81,
	Gerbereien	82,
	Textilreinigung	83, 84, 85, 86
Nahrungsmittel-industrie	Fleischverarbeitung	87
	Fischverarbeitung	87
	Obst und Gemüse	87
	Molkerei	87
	Pflanzliche Öle und Fette	87
Chemie	Allgemein	88
Abfall- und Altlastenbehandlung	Kunststoffaufbereitung	89; 90; 91
	Altfahrzeug-Recycling	92, 93
	Bodensanierung	94; 95; 96
Wasserbehandlung	Trinkwasser	97
	Brauchwasserbehandlung	98
	Abwasserreinigung	99, 100
Sonstige	Archäologie	101, 102

Am Beispiel der Mineralstoffindustrie werden diese Recherchen näher erläutert.

8.2 Anwendung der Flotation am Beispiel der Mineralstoffindustrie

Mineralindustrie In der Mineralstoffindustrie ist das Verfahren der Flotation ein wesentliches Trenn- und Sortierverfahren [72]. Dabei ist die Anwendbarkeit der Flotation als eines der wichtigsten Sortierverfahren im Fein- und Feinstkornbereich der Mineralindustrie vielfältig und umfasst die Aufbereitung von Sulfidmineralien, die Behandlung von Phosphaterzen, die Trennung von löslichen Mineralien wie Halit und Sylvinit, die Abtrennung von Schwefel und Asche bei der Kohleaufbereitung, und die Aufbereitung von Feingold.

Bei der Flotation von Erzen, die mehr als ein Mineral enthalten, gibt es zwei Möglichkeiten der Aufbereitung. Bei der sogenannten schrittweisen-selektiven Flotation werden die Mineralien nacheinander flотиert (Beispiel: Zinkflotationskreis bei der Flotation eines komplexen Sulfiderzes). Bei der kollektiv-selektiven Methode werden wertvolle Minerale gemeinsam flотиert und das Konzentrat anschließend aufgeteilt.

Flotationsprozess

In gewöhnlichen Erzen und Gesteinen haben die Kristalle eine durchschnittliche Größe von ca. 0,2 mm. Nach der Zerkleinerung der Mineralien, als Vorstufe der Anreicherung, besitzen die Partikel eine Größe von weniger als 0,1 mm [68]. Die Flotation stellt ein geeignetes Verfahren dar, diese kleinen Partikelgrößen zu selektieren, wobei eine unterschiedliche Benetzbarkeit zur Trennung der Mineralpartikel vorausgesetzt wird. Die Benetzbarkeit hängt von den unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften der Partikel ab. Mineralien wie Graphit oder Molybdänglanz sind von Natur aus hydrophob, während die meisten hydrophil sind. Zur Hydrophobierung verwendet man **Sammler** aus organischen Verbindungen, deren Wirksamkeit vor allem durch den pH-Wert beeinflusst wird [68]. Wenn verschiedene Minerale nach Zusatz eines Sammlers an den Luftblasen haften, werden sogenannte **Drücker**, passivierende/drückende Reagenzien, zugesetzt, um die Mineralien wieder voneinander zu trennen. **Schäumer** werden analog zur Deinkingflotation zugesetzt, um das Zerplatzen der mit Mineralien beladenen Luftblasen zu verhindern, wenn sie an die Wasseroberfläche kommen.

8.3 Anwendung der Flotation in unterschiedlichen Industriebranchen

Allgemein

In zahlreichen Industriebranchen und Anwendungen werden Flotationsverfahren zur Stofftrennung und zur Abtrennung von Verunreinigungen eingesetzt. Nachfolgend werden für die recherchierten Branchen die Einsatzgebiete einer Flotation und die dafür relevanten Prozessschritte beschrieben.

Mineralstoffindustrie

Bei der Aufbereitung von Mineralen werden durch Zerkleinerungs-, Sortier- und Klassierprozesse mineralische Konzentrate gewonnen. Die Zerkleinerung erfolgt in der Regel über Brecher (Backen-, Kegel- und Prallbrecher zur Vorbrechung sowie Backen-, Kegel-, Prall-, Walzen- oder Hammerbrecher für die Nachbrechstufe) und Mahlaggregate (Trocken- und Nassvermahlung). In anschließenden Sortier- und Klassierprozessen (Sieben, Klassifizieren, Sink-scheidung, Flotieren, Magnetscheidung, elektrostatische Sortierung) werden die gewünschten Elemente von der Gangart und voneinander entfernt. Die Flotation ist in der Mineralienaufbereitung ein bewährtes Sortier- und Trennverfahren im Fein- und Feinstkornbereich (Vergleiche auch Abschnitt 8.2).

**Altlastensanie-
rung**

Die Flotation als Aufbereitungsverfahren kontaminierter Böden zählt im Bereich der Bodensanierung zu den Bodenwaschverfahren. Die Schadstoffe werden bei der Wäsche nicht zerstört oder abgebaut. Sie werden in der Regel in der Feinstkornfraktion (Schluff) aufkonzentriert und müssen gesondert entsorgt werden [96].

Die Verfahrensschritte der Bodenwäsche untergliedern sich in Bodenvorbereitung, Nassaufschluss, Schadstoffabtrennung, fest / flüssig Trennung, Nachbearbeitung der Reststoffe. Die Unterteilung in die genannten Verfahrensschritte ist modellhaft und weicht je nach Anwendungsfall von diesem Muster ab. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Übergänge zwischen den einzelnen Verfahrensstufen in der Praxis meist fließend sind und sich überschneiden. So ist zwischen dem Nassaufschluss und der Schadstoffabtrennung eine klare Abgrenzung nicht möglich.

Einsatzgebiete des Flotationsverfahrens im Rahmen von Bodenbehandlungstechnologien lassen sich wie folgt angeben [94].

- **Abtrennung schadstoffbelasteter Feststoffanteile**, bevorzugt Leichtstoffe, Kohle- bzw. KW-haltige Bestandteile.
- **Abtrennung öliger Phasen**, Emulsionsspaltung, Aufarbeitung ölhaltiger Schlämme.
- **Prozesswasseraufbereitung** - Wasser mit hohen Anteilen an Feststoff (<0,025 bis 0,063 mm) und öligen Phasen, damit hohen Schwimmschlammanteilen, allgemein in Verbindung mit Fällung und Emulsionsspaltung als Vorbehandlung.
- **Abwasseraufbereitung**, gegebenenfalls in Verbindung mit der Aufbereitung kontaminierten Grundwassers (Fällung, Flockung als Vorbehandlung).

**Nahrungsmittel-
industrie**

In der Nahrungsmittelindustrie wird zur Aufbereitung der beim Produktionsprozess anfallenden Abwässer die Flotation als bewährtes Verfahren für den Schritt der mechanischen Vorreinigung eingesetzt.

In Vorbereitung auf den flotativen Prozess werden die Abwässer über Rechen und Siebe vor groben Verunreinigungen befreit. Je nach Zielstellung der Flotation können Hilfschemikalien zur Fällung und Flockung der abzutrennenden Stoffkomponenten eingesetzt werden

Im Bereich der Nahrungsmittelindustrie werden durch die Flotation freie lipophile Stoffe, suspendierte Feststoffe, Stickstoff und Phosphor sowie der BSB/CSB in ihrer Konzentration verringert. Die Flotation wird beispielsweise in den Branchen Fleisch, Fisch, Obst und Gemüse, Molkereiprodukte, Getränke und pflanzliche Öle und Fette eingesetzt.

Textilindustrie

In der Textilindustrie werden große Wassermengen eingesetzt. Abwasser aus dem Vorbehandlungsprozess (z.B. Bleichen, Kochen, Waschen) enthält meist organische Verunreinigungen, die größtenteils aus Stoffen stammen, die bei vorherigen Behandlungen hinzugefügt wurden. Beispiele für solche Stoffe sind Öle und natürliche Verunreinigungen durch tierische und pflanzliche Fasern. Beim Bedrucken und Färben ist die Farbe des Abwassers ein zusätzliches Problem, das nur abhängig vom Farbstofftyp (reaktiv, dispers oder sonstige) mit einer Koagulation bzw. einer Flotation gelöst werden kann. Zur Reduzierung der

organischen Fracht und insbesondere zur Entfärbung werden Textilabwässer seit mehr als 100 Jahren mittels Fällung/Flockung behandelt. Das Fällungsprodukt wird durch Entspannungsflotation abgetrennt.

Chemische Industrie

Auch im Bereich der chemischen Industrie wird eine Flotation vor allem zur Behandlung von Abwässern eingesetzt. Die bedeutendsten Anfallstellen von Abwasser in der chemischen Industrie sind chemische Synthesen, Abgasbehandlungssysteme, Aufbereitung von Brauchwasser, Abschlammung aus Kesselspeisewassersystemen, Abschlammung aus Kühlkreisläufen, Rückspülwasser von Filtern und Ionenaustauschern, Deponie-Sickerwasser, Regenwasser aus kontaminierten Bereichen usw..

In der chemischen Industrie wird eine Flotation vor allem dann eingesetzt, wenn eine Sedimentation aufgrund schlechter Absetzeigenschaften weniger geeignet ist, der Dichteunterschied zwischen den suspendierten Stoffen und dem Abwasser zu gering ist, räumliche Einschränkungen am Standort vorhanden sind oder Öle und Fette entfernt werden müssen.

Kunststoffindustrie

Obwohl die Flotation als Aufbereitungsschritt zur Abtrennung von Kunststoffen seit in der Literatur beschrieben ist und als geeignet gilt, gibt es bisher keine großtechnische Umsetzung dieses Verfahrensschrittes.

Auch im Bereich der Kunststoffaufbereitung wird eine Flotation meist in Abwasserreinigungsanlagen eingesetzt. Dabei dient sie zur Entfernung von Schwebstoffen (z.B. Papierfasern) aus dem Waschwasser.

8.4 Zuordnung der angewandten Prozessschritte zu den 3 Teilmechanismen

Zuordnung und Bewertung

Anhand der Recherchen wurde geprüft, welche der 3 Mechanismen für die einzelnen eingesetzten Prozessschritte relevant sind. In der nachfolgenden Tabelle ist eine Zuordnung der physikalischen Mechanismen zu den einzelnen Prozessstufen getrennt nach Industriebranchen dargestellt. Die Bedeutung der physikalischen Mechanismen innerhalb den Prozessstufen wurde anhand von 3 Bewertungsstufen dargestellt (siehe **Tab. 2**).

Überblick

Tab. 15 Vorkommen der Mechanismen in den Industriebranchen (Legende siehe Tab. 2)

		M1	M2	M3
Industriebranche	Prozessstufe	Ablösung / Anlagerung	Zerkleinerung / Agglomeration	Austrag
Papier	Zerfaserung	+++	+++	
	Wäsche			+++
	Deinkingflotation		+ *	+++
	Disperger	+++	+++	
Mineralstoffindustrie	Brechen		+++ +	
	Mahlen (Nassaufschluss)	++	+++ ++	
	Sortieren / Klassieren			+++
	Flotation			+++
Bodensanierung	Zerkleinerung		+++	
	Nassaufschluss	++	+++	
	Klassieren			+++
	Flotation			+++
Textilreinigung	Waschprozess	+++	+	
Abwasseraufbereitung	Fällung	+++		
	Flockung			+++
	Mikroflotation			+++

Zerkleinerung, Agglomeration

Bei der Trockenvermahlung von Mineralien können durch den hohen Druck Agglomerate gebildet werden, die je nach Aufgabegut und gewähltem Druck unterschiedliche Festigkeiten aufweisen (Kalkstein: sehr fest, Quarz / silikathaltiges Gut: leicht zerbröselnd). In Wasser zerfallen in der Regel diese Agglomerate wieder. Bei trockenen Verfahrensschritten müssen jedoch Maßnahmen getroffen werden, um die Agglomerate zu zerkleinern, so dass das erzeugte Fein- und Feinstkorn für den Flotationsprozess freigelegt wird.

Modifizierende Maßnahmen zur Partikelvergrößerung haben auch im Bereich der Bodensanierung große Bedeutung [94]. Für ungelöste, feindisperse Partikel kommen Maßnahmen wie Flockung (Agglomerationsflotation) oder die gezielte Anlagerung an groben Partikeln (Trägerflotation) in Frage. Für Stoffe in gelöster Form stehen Fällung und Flockung sowie Adsorption zur Verfügung. Bei der Feinstkornsartierung von Mineralien stellen die Agglomerationsflotation und die Trägerflotation besondere Varianten der Flotation dar, die nur in geringem Umfang industriell genutzt werden.

Ablösung, Anlagerung

Klassische Ablösevorgänge, wie sie dem Ablösen der Druckfarbenpartikel von der Papierfaser entsprechen, finden sich auch im Bereich der Bodensanierung. Hier werden beim Verfahrensschritt Nassaufschluss Schadstoffe von Bodenpartikeln gelöst. Übertragen werden kann dieser Mechanismus auch auf die Mineralienaufbereitung, bei der durch den Zerkleinerungsprozess die Mineralien von der Gangart abgetrennt / abgelöst werden. Weitaus besser lässt sich der Ablösevorgang in der Mineralienaufbereitung auf Gesteine übertragen, die im trockenen oder wenig feuchten Zustand eine feste geschlossene Struktur einneh-

men, aber bei Zugabe von Wasser und mäßigem Energieeintrag in sehr feinkörnige, mineralische Bestandteile zerfallen. Beispiele hierfür sind Tone und Lehm sowie Kreide. Das Dispergieren und Abtrennen der zerreibbaren Substanzen nennt man Läutern. Apparativ werden für den Läutervorgang Schwertwäscher und Läutertrommeln eingesetzt. Ähnliche Apparate finden sich auch in der Bodensanierung wieder. Grundsätzlich ist für die Aufhebung der Bindungskräfte zwischen Schadstoff und Bodenkorn bzw. zwischen Mineral und Bodenkorn der Eintrag mechanischer Energie erforderlich. Nach [94] kann im Bereich der Bodensanierung je nach Anwendungsfall die Zugabe von Tensiden zu einer Verbesserung des Ablösevorganges führen.

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

Wird der Prozessschritt des „Ablöses“ unabhängig vom Flotationsprozess betrachtet, so finden sich vor allem im Bereich der Textilreinigung große Analogien zur Entfernung von Druckfarbenpartikeln. Hier nutzt man ebenfalls Tenside, die sich aufgrund der Grenzflächenaktivität bevorzugt an der Grenzfläche zwischen Wasser und Textiloberfläche anlagern. Textilfasern und Schmutzpartikel sind von Tensidmolekülen umgeben, wobei der hydrophile Molekülteil in die wässrige Lösung ragt. Je nach Art der Ladung, die der hydrophile Teil des Moleküls trägt, unterscheidet man zwischen anionischen, nichtionischen, kationischen und amphoteren Tensiden.

Beim Waschprozess wird der Schmutz zunächst mit Tensiden umschlossen und anschließend von der Textiloberfläche abgelöst. Dieser Ablösevorgang wird dadurch unterstützt, dass sich die Tensidmoleküle auch an der Oberfläche des Textils angelagert haben. Die Tensidmoleküle sind negativ geladen, so dass es zwischen der mit Tensidmolekülen belegten Oberfläche und den mit Tensidmolekülen belegten Schmutzpartikeln zu einer elektrostatischen Abstoßung kommt. Die elektrostatische Abstoßung bewirkt auch eine Zerteilung der Schmutzpartikel. Zur restlosen Beseitigung des Schmutzes ist auch mechanische Bewegung nötig. Daher die Reinheit auch durch die Bewegung der Wäsche während des Waschvorgangs mitbestimmt.

Austrag durch Sortierung und Klassierung

Für die Papierindustrie dienen Klassier- und Sortierprozesse zur Abtrennung von Verunreinigungen. Im Bereich der Mineralienaufbereitung und Bodensanierung werden über das Klassieren und Sortieren gezielt Fraktionen erzeugt, die Gutstoff, Reststoff oder weiter aufzubereitendes Produkt darstellen können.

Konditionierung

Nach [94] ist beim Bodenwaschen der Einsatz von Hilfsmitteln zur gezielten Beeinflussung der Hydrophobie nicht üblich, da man von natürlichen Hydrophobieunterschieden (z.B. Öl, Teerteilchen) ausgeht.

Von großer Bedeutung im Bereich der Mineralienaufbereitung ist der Einsatz von Flotationsreagenzien. Um die Flotation gezielt zu beeinflussen, werden Sammler, Regler und Schäumer eingesetzt. Sammler sind selektiv wirkende, hydrophobierende Reagenzien. Regler beeinflussen die Adsorption des Sammlers, als Drücker zur Verhinderung der Adsorption bzw. als Beleber für eine spätere Aktivierung der Adsorption. Eine wesentliche Rolle spielt hierbei der pH-Wert. Schäumer sind grenzflächenaktive Reagenzien, die zur Erzielung einer

geeigneten Schaumschicht verwendet werden.

Zur Erzielung des Trennerfolges beim Deinken werden hydrophobierende und Schaum stabilisierende Reagenzien zugefügt. Bei der Abwasseraufbereitung werden je nach Anwendungsfall zusätzlich Chemikalien zur Fällung und/oder Flockung eingesetzt.

Austrag durch Flotation

Für die Anwendung der Flotation im Rahmen von Bodenwaschverfahren gibt es zwei technologische Ziele, die selektive Trennung des Feststoffes in einen schadstofffreien Feststoffanteil und ein Schadstoffkonzentrat oder die Abtrennung des gesamten Feststoffes aus der Suspension (Suspensaabtrennung). Die selektive Abtrennung der Schadstoffkomponente entspricht sowohl dem klassischen Anwendungsgebiet der Flotation in der Mineralienaufbereitung als auch der selektiven Trennung von Druckfarbenpartikel bei der Altpapieraufbereitung. Für die selektive Partikeltrennung im Bereich der Bodensanierung und für die Abtrennung von Mineralien haben sich apparativ vor allem Rührwerksapparate durchgesetzt [72, 94].

Hingegen dient die Flotation in der Abwasserreinigung dem Abtrennen der festen von der flüssigen Phase und ist dementsprechend kein Sortierverfahren. Die (unselektive) Flotation in der Wasseraufbereitung kann vielmehr als „umgekehrte Sedimentation“ angesehen werden [75]. In der industriellen Abwasserreinigung können Fällungs- und Flockungsprozesse als Konditionierung der abzutrennenden Stoffkomponente vorgeschaltet werden. Bei der nicht-selektiven Suspensaabtrennung aus Abwässern kompensiert man die geringe Hydrophobie durch Anwendung sehr kleiner Blasen. Aus diesem Grund wird apparativ im Bereich der Abwasserbehandlung vorwiegend die Entspannungsflotation (Mikroflotation) eingesetzt.

Fazit

Wie die Auswertungen zeigten, können die in anderen Industriebranchen angewandten Prozessschritte gut denjenigen der Papierindustrie zugeordnet werden. Die dort stattfindenden Teilmechanismen sind vergleichbar.

Dabei zeigte sich, dass die Größenverteilung der eingesetzten Materialien eine wesentliche Rolle spielt. Damit kann der in 6.1 aufgezeigte Ansatz zur Beschreibung der Größenverteilung gut auf andere Branchen übertragen werden.

Wesentliche Einflussgrößen, wie z.B. pH-Wert, Chemikalieneinsatz und Temperatur sind ebenfalls vergleichbar. Die daraus resultierenden Beschreibungen sind nach entsprechender Kalibrierung an die entsprechenden Aufgabenstellungen anzupassen.

Mit dem Nelson Koeffizienten kann der Austrag auch in anderen Branchen gut beschrieben werden, da hier ebenfalls die Flotationsdauer die wesentliche Einflussgröße ist. Um die Genauigkeit der Beschreibungen zu verbessern, sind branchenspezifische Einflussgrößen noch zu ergänzen.

Ansprechpartner für weitere Informationen:

Dr. Gert Meini
Tel. 03529 / 551-630
gert.meini@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
Pirnaer Str. 37
01809 Heidenau
Tel. 03529 / 551-60
Fax 03529 / 551-899
e-Mail: info@ptspaper.de
www.ptspaper.de

Literaturverzeichnis

- 1 VAUCK W., MÜLLER H.
Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik
Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1982
- 2 SCHUBERT H.
Aufbereitung fester Stoffe, Band II: Sortierprozesse
Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1996
- 3 N.N.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Flotation>
- 4 N.N.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Flotation>
- 5 AMAND F.J.S.
Hydrodynamics of deinking flotation
International Journal of Mineral Processing, 56, 277-316 (1999)
- 6 PAULSEN F.G., PAN R., BOUSFIELD D.W., THOMPSON E.V.
The dynamics of bubble/particle approach and attachment during flotation and the influence of short-range non-hydrodynamics forces on disjoining film rupture
2nd Research Forum on recycling, Ste-Adele, Canada, 1993
Montreal: Canadian Pulp and Paper Association 1993
- 7 HEINDEL T.J.
Fundamentals of flotation deinking
Tappi Journal 82, 115 – 124 (1999), Nr. 3
- 8 HEIMONEN J., POUSI J.
Optimisation of flotation cell performance
5th Research Forum on recycling, 1999, Ottawa
Montreal: Pulp and Paper Technical Association of Canada 1999
- 9 STRAUSS J., BLASIUS K.
Verbesserung der optischen Eigenschaften des Deinkstoffes unter Berücksichtigung der Partikelgrößenverteilung von Druckfarben beim Deinkingprozess
PTS-Forschungsbericht 01/06 (AiF 13632),
München: PTS 2006, www.ptspaper.de
- 10 HANECKER E.
DIP-Stoff-Qualität in Abhängigkeit von der Rohstoffzusammensetzung und Verfahrenstechnik
10th PTS-CTP Deinking Symposium, Munich, Germany, 2002
Munich: PTS-Verlag 2002
- 11 BOS J.H., VEENSTRA P., VERHOEVEN H., DE VOS P.D.
Das Papierbuch, Handbuch der Papierherstellung
AK HOUTEN; Wolters-Noordhoff Verlag 2006
- 12 HOLIK H.
Unit operations and equipments in recycled fiber processing
In: Götsching L. and Pakarinen H., Papermaking Science and Technology, Book 7, Recycled Fiber and Deinking, 94 (2000)

- 13 SCHWARZ M.
Design of recycled fiber processes for different paper and board grades
In: Göttsching L. and Pakarinen H., Papermaking Science and Technology, Book 7, Recycled Fiber and Deinking, 94 (2000)
- 14 RENNER K.
Deinkability of printing inks
In: Göttsching L. and Pakarinen H., Papermaking Science and Technology, Book 7, Recycled Fiber and Deinking, 94 (2000)
- 15 AMAND F.J.S., PERRIN B.
The Effect on particle size on ink and speck removal efficiency of the deinking steps
Pulp & Paper Canada 94, 25 – 32 (1993), N. 10
- 16 PAN R., PAULSEN F.G., JOHNSON D.A. u.a.
A global model for predicting flotation efficiency. Part I: Model results and experimental studies
Tappi Journal 79, 177 – 185 (1996); Nr. 4
- 17 PAN R., PAULSEN F.G., JOHNSON D.A., BOUSFIELD D.W. u. E.V. THOMPSON
Statistisches Gesamt-Modell für das Flotationsdeinking: Modellvoraussagen des Flotationswirkungsgrades und experimentelle Bestätigung
Wochenblatt für Papierfabrikation 123, 920 - 925 (1995), Nr. 20
- 18 SCHELDORF J.M., STRAND B.C.
Simulation der Druckfarbenausscheidung und eine Deinkinganlage für Zeitungsdruckpapier
Tappi Journal 79; 135 - 141 (1996); Nr.12
- 19 KAPPEN J., HAMANN L.
Entwicklung einer Systemanalyse zur Kontrolle der Schmutzpartikel bei der Erzeugung von Papieren aus Deinkstoff
PTS-Forschungsbericht 11/07 (IW 50282)
Heidenau: PTS 2007, www.ptspaper.de
- 20 STRUNZ, A.-M.
Höhere Effektivität der Druckfarbentfernung in Deinkinganlagen unter Nutzung einer neuen Bewertungsmethode
PTS-Forschungsbericht 47/08 (IW 070152)
Heidenau: PTS 2008, www.ptspaper.de
- 21 KLEIN M.
Verfahrenskombination Zerkleinerung/Flotation für eine Druckfarbentfernung
PTS Forschungsbericht 10/08 (AiF 14703)
Heidenau: PTS 2008, www.ptspaper.de
- 22 HANECKER E.
Optimale Druckfarbentfernung durch die Verfahrensstufen Flotation und Dispergierung
PTS-Forschungsbericht 19/08 (14763)
München: PTS 2008, www.ptspaper.de
- 23 BÄR G.
Verbesserung der optischen Sauberkeit/Homogenität von Deinkingstoff für hochwertige grafische Massenpapiere und Market-Pulp
PTS-Forschungsbericht 25/08 (AiF 14809)
Heidenau: PTS 2008, www.ptspaper.de
- 24 STRAUSS J.
Verbesserung der Deinkstoffqualität durch Beeinflussung des Ablöse-/Anlagerungsverhaltens von Druckfarben (Restdruckfarben) während des Aufbereitungsprozesses
PTS-Forschungsbericht 39/08 (AiF 15078)
München: PTS 2009, www.ptspaper.de

- 25 HANECKER E., STRUNZ A.-M.
Neuer Einsatz zur Verbesserung des Deinkingergebnisses durch den gezielten Einsatz von Tensiden beim Neutraldeinking
PTS-Forschungsbericht
München: PTS2003, www.ptspaper.de
- 26 WALTER R.
Einfluss bestimmter Flotationsparameter auf die Druckfarbenentfernung und die optischen Eigenschaften der Deinkingstoffe, Diplomarbeit
München: Hochschule München 2008
- 27 ALTENBURG C.
Ermittlung der Wirkung verschiedener Prozessvariablen auf die Partikelgrößenverteilung und das Abtrennverhalten von Druckfarben mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung, Diplomarbeit
München: TU München 2005
- 28 BARTL M.
Erstellung einer Hypothese und statistische Datenauswertung zur Entwicklung eines praxisnahen und effizienten Beschreibung der komplexen Prozesse bei der Abtrennung von Verunreinigungen im Deinkingprozess, Diplomarbeit
München: Hochschule München 2009
- 29 KUNKEL S.
Beitrag zur Aufklärung des Entstehungsmechanismus für das Vorhandensein von Restdruckfarben im Deinkstoff, Diplomarbeit
München: Hochschule München 2007
- 30 SIMSTICH B.
Prozesssimulation als Mittel zur Optimierung der Altpapierstoffaufbereitung, Diplomarbeit
München: TU München 2005
- 31 STELZLE M.
Optimierung der Messung großer Schmutzpunkte mit Hilfe der digitalen Bildanalyse, Diplomarbeit
München: Hochschule München 2006
- 32 AGNIHOTRI P.K., BANSAL M.C.
Deinking model for ONP on the basis of deinkability factor
papier a celuloza 59, 232 – 236 (2005) Nr. 7-8
- 33 AJERSCH M., PELTON R.
Mechanisms of pulp loss in flotation deinking
Journal of Pulp and Paper Science 22, 338 – 345(1996), Nr. 9
- 34 BENEVENTI D., ROUSSET X., ZENO E.
Modelling transport phenomena in a flotation de-inking column. Focus on gas flow, pulp and froth retention time
International Journal of Mineral Processing, 80, 43-57 (2006), No. 1
- 35 BLOOM F., HEINDEL T.J.
Modeling flotation separation in a semi-batch process
Chemical Engineering Science, 58, 353-365 (2003), Nr.2
- 36 KLEIN R., SCHULZE U., HANECKER E.
Stand und Entwicklungstrend der messtechnischen Bewertung von optischen Inhomogenitäten als Grundlage einer Prozessbewertung und –optimierung
Wochenblatt für Papierfabrikation 134, 350 - 358 (2006), Nr. 7

- 37 MEINL G., ALTMANN S.
Entwicklung einer praxisnahen und effizienten Beschreibung der komplexen Prozesse bei der Abtrennung von Verunreinigungen in der Flotation am Beispiel der Druckfarbentfernung in der Altpapierstoffaufbereitung
PTS-Forschungsbericht 05/09 (IW 071029)
Heidenau: PTS 2009
- 38 KUNTZSCH T., MEINL G.
Beschreibung der Gleichmäßigkeit sowie des Mahl- und Fraktionierverhaltens von Faserstoffen mittels eines Softensors
Heidenau: PTS 2007, PTS Faserstoffsymposium 2007
- 39 TORNBORG J., PAAVILAINEN L.
Mathematical analysis of fibre length distributions
Applications to papermaking, TAPPI Paper Physics Conference 1991
- 40 REDNER R.A., WALKER H.F.
Mixture densities, maximum likelihood and the EM algorithm
SIAM – Review 26, (1984), Nr. 1
- 41 FRANK E.
Offset-Druckfarben – Trends und technische Anforderungen
in: 12. PTS-CTP-Deinking-Symposium,
München: PTS 2006, PTS Symposium DE 2006
- 42 ZAGAR S.J.
Computational fluid dynamics helps solve web stability problem
Pulp and Paper 70, 101 – 104 (1996), Nr. 13
- 43 BENEVENTI D, BENESSE M., CARRÉ B., JULIEN SAINT AMAND J., SALGUERO L.
Modelling deinking selectivity in multistage flotation systems
Separation and Purification Technology, 54, 77-87 (2007)
- 44 LAPLANE A.R., KAYA M., SMITH H.W.
The effect of froth on flotation kinetics. A mass transfer approach
Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review , 5, 147 – 168 (1989)
- 45 NEETHLING S.J., CILLIERS J.J.
Solids motion in flowing froths
Chemical Engineering Science 57, 607 – 615 (2002), Nr. 4
- 46 PAN R., BOUSFIELD D.W. u. E.V. THOMPSON
Modelling particle-bubble dynamics and adhesion in air bubble / solid particle / liquid systems
1992 Pulping Conference 1992 in Boston
Atlanta: Tappi press 1992
- 47 AJERSCH M., PELTON R.
Modelling fibre loss by entrainment during flotation of flocculated pulp
Journal of Pulp and Paper Science 25, 30 – 36 (1999), Nr. 1
- 48 AJERSCH M., PELTON R.
Characterizing flocculation in pulp suspensions from batch flotation and pulp sedimentation experiments
4th Research forum on recycling, Quebec, Canada
Montreal: Canadian Pulp and Paper Association 1997
- 49 BLOOM F., HEINDEL T.J.
A Theoretical Model of Flotation Deinking Efficiency
Journal of Colloid and Interface Science, 190, 182-197 (1997),Nr.1

- 50 BLOOM F., HEINDEL T.J.
On the structure of collision and detachment frequencies in flotation models
Chemical Engineering Science, 57, 2467-2473 (2002), Nr.13
- 51 CARRASCO F., PELACH M. A., MUTJE P.
Deinking of high-quality offset papers : Influence of consistency, agitation speed, and air flow rate in the flotation stage
Tappi Journal, 82, 125-129 (1999), 3
- 52 DENG Y.
Effects of fiber surface chemistry on the fiber loss in flotation deinking
TAPPI Journal, 83, 61 (2000), 6
- 53 DRABEK O., STERNE J., VAN DE VEN T.G.M.
Effect of deinking decimals on the deposition of fines and fillers on an air–water interface
Journal of Pulp and Paper Science, 24, 116-120 (1998), 4
- 54 EPPLE M., SCHMIDT D.C., BERG J.C.
The effect of froth stability and wettability on the flotation of a xerographic toner
Colloid & Polymer Science, 272, 1264-1272 (1994), 9
- 55 LABIDI J.
Predicting flotation efficiency using neural networks
Chemical Engineering and Processing, 46, 314-322 (2007), 4
- 56 MOE S.T., RØRING A.
Theory and practise of flotation deinking
proceedings from the 2001 6th Research forum on Recycling Magog Canada
- 57 CARRE B., RUIZ J., OTTENIO P., BRUN J.
Optimisation of deinking circuit water design by modelling
9th PTS-CTP Deinking Symposium, Munich, Germany, 9-11 May 2000
Munich: PTS-Verlag 2000
- 58 HARRISON A.
Flotation deinking is critical in unit process method of deinking
Pulp and Paper USA 63, 60 – 65 (1989), Nr. 3
- 59 PALMQUIST M., JERNSTROEM A., MAKINEN M.
An effluent-free integrated DIP mill: a simulation study employing various separation technologies
2004 TAPPI Paper Summit, Atlanta 2004
Atlanta: Tappi Press 2004
- 60 PASSAS R., ROUX J.C., DELPECH F.
Simulation einer Deinkingeinheit
Revue ATIP 50, 238 – 244 (1996), Nr. 6
- 61 ARBITER N.
Flotation Rates and Flotation Efficiency
AIME Transactions, 190, 791-796 (1951)
- 62 RUIZ J., OTTENIO P., BRUN J. u.a
Modelling of deinking process: a useful tool for optimization
6th CTP/PTS Advanced Training Course on Deinking Technology
Grenoble 2003
- 63 BIENERT CH.
Reduktion von Rejekten aus der Altpapieraufbereitung
München: Papiertechnische Stiftung (PTS) 2001
PTS-Forschungsbericht PTS-FB 08/01

- 64 BIENERT CH.
Dynamische Prozesssimulation als Mittel zur Optimierung der Deinkingtechnologie bei der Herstellung von Zeitungsdruckpapier in Altpapier verarbeitenden Papierfabriken
München: Papiertechnische Stiftung (PTS) 2002
PTS-Abschlussbericht IGF 12169
- 65 BIENERT CH., CORDIER O., KAPPEN J.
Reduzierung von Faserstoffverlusten und Einsparung von Entsorgungskosten durch Optimierung der Aufbereitung von Altpapier für die Erzeugung von graphischen Papieren mittels Prozesssimulation
München: Papiertechnische Stiftung (PTS)
PTS-Abschlussbericht PTS IGF 13355
- 66 ARTEAGA K.
Bilanzierung und praxisnahe Messung von Druckfarbenpartikeln als Mittel zur Optimierung der Altpapierstoffaufbereitung, Masterarbeit
München: TU München 2006
- 67 KÖRKKÖ M.
Components Removal in Flotation Deinking
Progress in Paper Recycling, Vol. 17, No.4, August 2008
- 68 N.N.
Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Band 2 Verfahrenstechnik, 81–142
Weinheim: Verlag Chemie 1972
- 69 N.N.
Vorlesungsmaterial – Mineralische Rohstoffe
<http://www.tu-dresden.de/biw/geotechnik/geologie/studium/minroh.htm>
- 70 N.N.
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereichs,
BMU – 2007 -697; Bericht 1; Reihe Umweltpolitik, Bonn 2007
- 71 N.N.
Ullmann's Encyclopedia of industrial chemistry, 6. Auflage, Band B2, Kapitel 23
Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH 1988
- 72 SCHUBERT H. (Hrsg.)
Aufbereitung fester Stoffe – Band II: Sortierprozesse
Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1996
- 73 HEMMING W.
Verfahrenstechnik, 7. Aufl.
Würzburg: Vogel Verlag 1993
- 74 N.N.
Society of Mining Engineers: SME Mineral Processing Handbook, Volume 1, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., 1985 New York
- 75 KELLERWESSEL H.
Aufbereitung disperser Feststoffe – Mineralische Stoffe, Sekundärrohstoffe, Abfälle
Düsseldorf: VDI Verlag 1991
- 76 N.N.
<http://www.mining-technology.com/projects/raglan/>

- 77 N.N.
Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Band 14 Verfahrenstechnik, S. 287 – 328
Weinheim: Verlag Chemie 1977
- 78 REICHELT A.
Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit Norm-Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände, Teil 3A – Bergbauliche Hinterlassenschaften der Steinkohlegewinnung
Forschungsvorhaben StSch 4386
München: TÜV Industrie Service GmbH 2004
- 79 N.N.
Beste verfügbare Techniken in Anlagen der Textilindustrie
Berlin: Umweltbundesamt 2002
- 80 DÖPKENS E.
Abwasserbehandlung und Prozesswasserrecycling in der Textilveredelungsindustrie, Dissertation
Braunschweig: TU Braunschweig 2004
- 81 N.N.
<http://www.wasser-wissen.de/lexikon/i/industrieabwaesser.htm>
- 82 N.N.
96. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Festlegung des Zielzustandes für Oberflächengewässer, Bundesgesetzblatt, 2006
- 83 N.N.
<http://www.laundry-sustainability.eu/de>
- 84 KUSCHNEROW J. et al.
Waschmittel und Waschprozess
Braunschweig: Technische Universität Braunschweig 2006
- 85 HÜNTEN M.
Abitur-Training Chemie, Grundkurs Chemie 2,
Freising: Stark Verlag 1997
- 86 N.N.
Wasch- und Reinigungsmittel, Umwelt Wissen
München: Bayerisches Landesamt für Umwelt, März 2008
- 87 N.N.
Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken in der Nahrungsmittel-, Getränke und Milchindustrie
Dessau: Umweltbundesamt 2005
- 88 N.N.
BVT-Merkblatt zu Abwasser- und Abgasbehandlung/ -management in der chemischen Industrie
Berlin: Umweltbundesamt 2003
- 89 MICHAELI W et al.
Stoffliches Kunststoff-Recycling – Anlagen, Komponenten, Hersteller
München: Hanser Verlag 1993
- 90 SCHMITT B.
Kunststoffe im produzierenden Gewerbe: Vergleichende ökologische Betrachtung verschiedener Verwertungswege im Bilanzrahmen Luxemburg, Diplomarbeit
Trier: FH Trier 2000

- 91 KOPYTZIOK N.
Sachgebiet Abfall: Vermeidung ökologischer Belastungen. Die ökologische Wirksamkeit der Vermeidung und Verwertung von Siedlungsabfällen.
Berlin: Rhombos-Verlag 1995, 2. Auflage Berlin 2001
- 92 N.N.
Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen – Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente am Beispiel von Kupfer und Blei
Berlin: IZT Institut für Zukunftstudien und Technologiebewertung, Dezember 2004
- 93 GOLDMANN D. et al.
Rückgewinnung von Metallen aus feinkörnigen mineralischen Abfällen
- 94 N.N.
Handbuch Bodenwäsche; Band 11
Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), 1993
- 95 NEUMAIER H. (Hrsg) et al.
Altlasten – Erkennen, Bewerten, Sanieren; 3. grundlegend überarbeitete und ergänzende Auflage
Berlin Heidelberg: Springer Verlag 1996
- 96 TITTEL R.
Bodenwäsche – Probleme und Grenzen; In: Bodenbehandlung – Stand der Technik und neue Entwicklungen; Fachtagungsband des Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 11. Juni 2002
- 97 MUTSCHMANN J. et al.
Taschenbuch der Wasserversorgung – 50 Jahre, 14. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2007
- 98 N.N.;
<http://www.huber.de/de/produkte/flotation/druckentspannungsflotation.html>
- 99 HAHN H.H. et. al.
Fortschritte bei der Anwendung des Flotationsverfahrens in der Abwasserreinigung; Reihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Nr.25
Karlsruhe: Universität Karlsruhe 1981
- 100 HOSANG W. et al.
Abwassertechnik, Ausgabe 11, Vieweg+Teubner Verlag, 1998
- 101 BODNER C. et al.
Separation of bone, charcoal, and seeds by chemical flotation
American Antiquity 45(1):110-116, 1980
- 102 KÜCHELMANN C.
Eine kurze Einführung in die Environmental Archaeology, University of Innsbruck and University of Yerevan

