

Reduzierung der spezifischen Abwassermenge und der Feststoffverluste durch Optimierung der Wasserkreisläufe bei der Erzeugung von Spezialpapieren

Achim Hutter

Zusammenfassung

Bei Spezialpapieren wurden im Jahr 2004 mit 33 l/kg die höchsten spezifischen Abwassermengen der deutschen Papierindustrie abgeleitet. Die absolute Höhe, die Schwankungsbreite sowie aus Umfrageergebnissen ermittelte Kennwerte ließen Optimierungspotenziale erwarten. Angesichts spezieller und teilweise teurer Rohstoffe für Spezialpapiere, eröffnet die Einengung der Wasserkreisläufe und Reduzierung von Feststoffverlusten mit dem Abwasser erhebliche Einsparpotenziale.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Verminderung des Abwasseranfalls und die gleichzeitige Erhöhung der Rohstoffausbeute bei der Erzeugung von Spezialpapier durch Optimierung des Wasserkreislaufsystems.

In vier Spezialpapier herstellenden Anlagen wurde der Prozess durch Bestimmung von analytischen Parametern, von Volumenströmen im Frisch-, Klar- und Abwasserbereich und von weiteren produktionsbezogenen Daten charakterisiert. Zur Auswertung wurden Darstellungsmöglichkeiten und Werkzeuge eingesetzt, die in vorangegangenen Projekten erarbeitet wurden. Mit Simulationsrechnungen wurden die Auswirkungen von Kreisläufeinengungen auf die Belastung der Wasserkreisläufe prognostiziert. Maßnahmenportfolios zur Reduzierung von Feststoffverlusten, Frischwassereinsatz und zur Entlastung der Papiermaschine wurden den Werken vorgestellt. Für alle untersuchten Werke konnten zahlreiche Optimierungsmaßnahmen vorgeschlagen werden. Beispielsweise konnte für ein Werk nachgewiesen werden, dass eine nachhaltige Reduzierung der spezifischen Abwassermenge von ca. 35% möglich ist. Bezüglich der Stoffverluste ist eine anhaltende Reduzierung um 15 bis 20% möglich.

Insgesamt wurden Einsparpotenziale zur Reduzierung der spezifischen Abwassermenge zwischen 40% und 64% ermittelt. Bei den Rohstoffverlusten betragen die Einsparpotenziale zwischen 21% und 84%. Wesentlich für die Reduzierung von Rohstoffverlusten ist, das Überlaufen von Behältern zu vermeiden und eine gute Klarwasserqualität sicher zu stellen. Zur Entlastung von Stofffängern und Verbesserung der Klarwasserqualität wurde ein Schaltungsvorschlag erarbeitet, bei dem stark feststoffhaltige Wasserströme im Konstanten Teil gehalten werden. Für die Höhe von Feststoffverlusten an Cleanern und mit ausgeschleustem Klarwasser wurden Richtwerte aufgestellt. Die Anwendbarkeit der für andere Sortenbereiche entwickelten K-Wert-Theorie wurde für den Sortenbereich Spezialpapiere bestätigt, ebenso die Methode der Volumenanalyse zur Bewertung der Puffervolumina. Abschließend wurden die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens und der Forschungsvorhaben AiF 9584 (Altpapier), AiF 10860 (holzhaltig) sowie AiF 13093-N (holzfrei) zusammengefasst. Die Anwendbarkeit der erarbeiteten Untersuchungs- und Bewertungswerkzeuge wurde verglichen und Kennwerte verschiedener Produktionsbereiche einander gegenübergestellt.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben AiF 13915N wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Unser Dank gilt außerdem den Projektbegleitern und den Vertretern der beteiligten Papierfabriken für die freundliche Unterstützung.

Abstract

Taking a look at individual grades and product groups shows that in the year 2004 with 33 l/kg the highest specific effluent volumes in the German paper industry occurred in the production of specialty papers. The absolute amounts of effluents and their variation limits clearly indicate optimisation potentials among the producers of specialty papers. This assumption is supported by specific values obtained through surveys. Due to the use of special and partly expensive raw materials for specialty papers, the narrowing of water circuits and the reduction of solids losses into the waste water opens up sizable saving potentials.

The project aims at reducing the effluent volumes whilst increasing the raw materials utilization in the production of specialty papers through the optimisation of water circuits.

The production processes of four specialty paper facilities were characterised by determination of analytical parameters, flows of fresh-, circuit- and waste water and further production related data. The evaluation was conducted by means of tools worked out in former projects. With the help of simulation models the consequences of circuit narrowing on the loading of water circuits were determined. Action plans for the reduction of solids losses, fresh water consumption and for the load relief of paper machines were presented to the mills. Numerous optimisation measures could be proposed for all mills examined in the project. In one mill, for instance, it could be shown that it is possible to durably reduce the specific effluent volume by about 35%. Regarding solids losses a permanent reduction of 15 to 20% can be achieved.

All in all reduction potentials between 40% and 64% were identified for specific effluent volumes. The savings potential for solids losses was in the range of 21% and 84%. In order to reduce solids losses, it is essential to avoid undesigned overflow of chests and ensure a good quality of the clarified water. For the relief of savealls and improvement of clear water quality a design arrangement was worked out where water flows with high solids loads are held back in the constant part. Target values were defined for the amounts of solids lost at cleaners and through overflowing clarified water. It could be confirmed that the K-value theory, which was set up for other paper grades, is applicable to the production of specialty papers as well. The same is true for the volume analysis, which evaluates buffer volumes. Finally the results of the research project presented here were combined with those of the research projects AiF 9584 (recovered fibre), AiF 10860 (wood containing) and AiF 13093-N (wood free). The applicability of the developed examination and evaluation tools was compared, and target values of different paper grades were set against each other.

Acknowledgement

The 13915N research project was sponsored by the German Federal Ministry of Economics and Technology BMWi and carried under the umbrella of the German Federation of Industrial Co-operative Research Associations (AiF) in Cologne. We would like to express our warmly gratitude for this support.

We would also like to express our thank to the involved companies for supporting project performance.

1 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung

Ausgangslage

Der spezifische Frischwasserbedarf und der Abwasseranfall bei der Papierherstellung wurden aufgrund wirtschaftlicher und ökologischer Erwägungen sowie rechtlicher Vorgaben in den letzten Jahrzehnten beständig reduziert. In einer Umfrage wurde für das Jahr 2004 die mittlere spezifische Abwassermenge der deutschen Papierindustrie zu 9,6 l/kg Bruttoproduktion ermittelt [1]. Die getrennte Betrachtung der einzelnen Produktgruppen zeigt, dass bei Spezialpapieren mit 33 l/kg die höchsten spezifischen Abwassermengen abgeleitet werden. Diese Fabriken tragen zwar nur zu 7 % zur Produktionsmenge bei, leiten aber 19 % des Abwassers ab [1]. Hier setzt das vorliegende Forschungsvorhaben an. Die angestrebte Reduzierung der Abwassermengen bei Spezialpapier-Herstellern entlastet nicht nur eine Vielzahl von kleinen Werken in ökonomischer Hinsicht, sondern beeinflusst auch nennenswert die Gesamtabwassermenge der deutschen Papierindustrie. Einsparungen von Frischwasser bzw. Abwasser reduzieren die Kosten für Wasserentnahme, Aufbereitung, Abwasserreinigung und Abwassereinleitung. Ebenso kostenrelevant sind jedoch Füll- und Hilfsstoffe, die produktionstechnisch bedingt anteilig mit dem Abwasser ausgetragen werden. Füllstoffe und Hilfsstoffe gemeinsam haben bezogen auf die Masse mit 18 % den dritthöchsten Anteil der bei der Papierproduktion in Deutschland eingesetzten Rohstoffe [2]. Der Anteil teurer Füllstoffe, wie z. B. Titandioxid, Farbpigmente oder Kaolin, betrug im Jahr 2004 immerhin 5,8% [2].

Erfassung des Ist-Zustandes

Grundlage jeder Systemoptimierung ist die Erfassung des Ist-Zustandes. Das Wissen, wie das Stoff-Wasser-System einer Papiererzeugung gestaltet ist, ist Voraussetzung für korrekte Entscheidungen zur Optimierung. Einer Bestandsaufnahme von Kreislaufsystemen muss damit erhebliches Augenmerk zukommen. Brecht gab als erster eine umfassende Darstellung untersuchter Kreislaufsysteme [3]. Laufmann [4] beschreibt einen Probenahmeplan, dessen Umfang jedoch für eine differenzierte Betrachtung nicht ausreicht. Im Rahmen der Forschungsvorhaben AiF 9584 [5], AiF 10860 [6] und AiF 13093 [7] wurden Vorgehensweisen zur systematischen Beschreibung des gesamten Wassersystems für die Sortenbereiche AP-Verarbeitung, Herstellung holzhaltiger und holzfreier Papiere entwickelt.

Reduzierung der Frischwassermenge

In den genannten AiF-Projekten wurden deutliche Potenziale zur Reduzierung der spezifischen Frischwasser- und Abwassermengen aufgedeckt. Liegen auch im Bereich der Spezialpapiere solche Potenziale vor? Der K1-Wert gibt Hinweise hierzu. Liegt diese Kenngröße unter 1, belegt dies Frischwasserverluste [8]. Eine Berechnung der K1-Werte für Spezialpapierhersteller aus Umfragewerten [9] liefert einen Mittelwert von $K1=0,75$ (Bereich 0,05–2,5). Der Zielwert von $K1=1$ wird deutlich unterschritten (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Ausmaß und Gründe für die zugrunde liegenden Frischwasserverluste galt es zu identifizieren und Gegenmaßnahmen aufzuzeigen. Zumindest für einige Werke im Bereich Spezialpapier deutet die Auswertung auf Wasser-Einsparpotenziale hin, die weit über denen in anderen Sortenbereichen liegen. Systematisch vergleichende Untersuchungen zu dieser Thematik liegen bislang nicht vor.

Reduzierung der Stoffverluste

Mit der Reduzierung von Feststoffverlusten mit dem Abwasser beschäftigen sich zahlreiche Autoren. Ansatzpunkte sind dabei z. B. das Recycling von Reststoffen [10, 11] oder Monitoring-Systeme, die Prozessdaten zur Überwachung von Stoffströmen nutzen [12, 13]. Weiterhin beziehen sich viele Ansätze auf „end of pipe“-Lösungen: Reststoffe werden erst rezykliert, wenn sie sich bereits im Abwasser befinden. Aussagen dazu, welche Verlustquellen quantitativ hervor treten und wie die Verlustentstehung dem Betreiber transparent wird, fehlen. In Veröffentlichungen wird die Problematik der Rohstoffverluste häufig im Zusammenhang mit Altpapierherstellern behandelt, selten jedoch im Bereich Spezialpapier. Chryssos, Maeck und Geller [14] beschreiben in einer Studie zur Verwertung und Vermeidung von Reststoffen praktizierte Methoden des Reststoffmanagements in verschiedenen Sortenbereichen und geben Empfehlungen für Verbesserungen. Dort werden gute Erfolge bei der Reduzierung von Faserstoffverlusten durch Optimierung der Kreislaufwasserreinigung erwartet.

Bewertung der Kreislaufschtaltung

Baumgarten und Welcker [**Fehler! Textmarke nicht definiert.**] definieren Kennwerte zur Verbesserung der Kreislaufschtaltung. In den Forschungsvorhaben AiF 9584, AiF 10860 und AiF 13093N konnte das Konzept von Kennwerten (K-Werte) für Papierfabriken mit integrierter Altpapierstoffherzeugung und mit integrierter Holzstoffherzeugung bestätigt und grundlegend erweitert werden. Die Aussagekraft der K-Werte bei Spezialpapierherstellern ist noch nicht systematisch untersucht.

Definition Spezialpapier

In den Bereich Spezialpapiere fallen " ... Papiersorten, deren Hauptmerkmal ihre speziellen Eigenschaften sind, die sie für den entsprechenden Verwendungszweck erbringen müssen (wozu oftmals die Verwendung von Spezialrohstoffen notwendig ist)" [15]. Fokussiert wird in diesem Forschungsvorhaben auf die Produktion von Papieren, die der genannten Definition genügen, nicht holzhaltig und nicht aus Altpapier hergestellt sind. Beispiele sind Banknotenpapier, Dekorpapier, Durchschreibepapiere, Elektroisolier- und Kondensatorpapiere, aromadichte und fettdichte Papiere, Filterpapier, Tapetenrohpapier.

2 Forschungsziel

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Verminderung des Abwasseranfalls und die gleichzeitige Erhöhung der Rohstoffausbeute bei der Erzeugung von Spezialpapier durch Optimierung des Wasserkreislaufsystems.

Mit den Forschungsergebnissen wird eine integrierte, systematische Vorgehensweise zur Erfassung, Bewertung und Optimierung von Wasserkreisläufen in Spezialpapierfabriken bereitgestellt. Mit ihrer Hilfe können die spezifische Abwassermenge und die Rohstoffverluste mit dem Abwasser vermindert werden. Fallspezifisch können weitere Ziele erreicht werden, wie die Verbesserung der Wasserqualität an der Papiermaschine, der optimierte Einsatz von Stofffänger-Aggregaten oder geringere Schwankungen im Stoff-Wasser-System. Für eine optimale Gestaltung der Wasserkreisläufe werden in Abhängigkeit von den Randbedingungen Benchmarkwerte und Regeln formuliert. Verbesserungspotenziale werden quantitativ und qualitativ benannt, ihre wirtschaftliche Relevanz wird aufgezeigt. Der Transfer der Ergebnisse (Optimierungspotenziale) in Beispielsanlagen wird dargestellt.

3 Material und Methoden

3.1 Vorgehensweise

Den in diesem Bericht dargestellten Auswertungen liegen Untersuchungen in vier Papierfabriken zur Erzeugung von Spezialpapieren zugrunde. In der folgenden Abb. 1 ist die angewandte Vorgehensweise schematisch dargestellt.

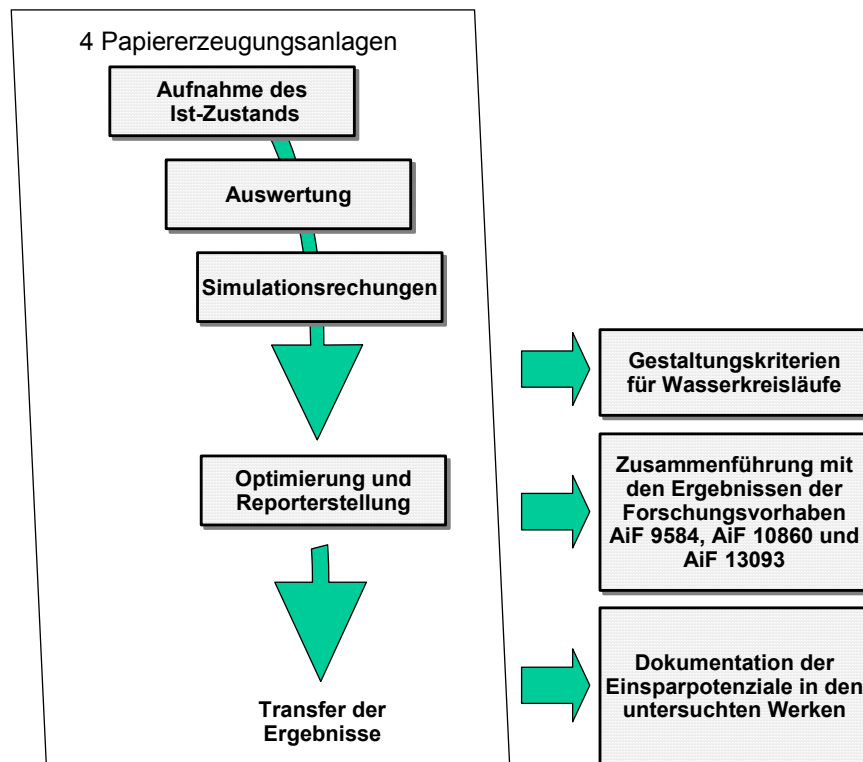


Abb. 1 Vorgehen des Forschungsvorhabens

3.1.1 Systemanalyse des Ist-Zustandes

Im Rahmen einer Vor-Ort-Untersuchung werden in den untersuchten Papierfabriken umfangreiche Untersuchungen zum Stoff-Wasser-System durchgeführt. Betriebsdaten, Infrastruktur und Schaltung werden aufgenommen. Volumenströme von Frischwasserverbrauchern und Abwasseranfallstellen werden bestimmt. An 20-40 Stellen werden Proben gezogen und auf folgende Parameter analysiert: CSB, DOC, Leitfähigkeit, pH-Wert, Temperatur, Chlorid, Sulfat, abfiltrierbare Feststoffe, Glührückstand (Asche). Nicht alle Parameter wurden in allen Proben bestimmt.

3.1.2 Auswertung

Mit den Kennwerten K1 und K2 sind die wichtigsten Ziele einer Kreislaufoptimierung (effektive Frischwassernutzung, maximale Entlastung der Papiermaschine und effektive Ausschleusung von Störstoffen) quantifizierbar. Die Basisdefinitionen sind:

K1-Wert	$K1 = \frac{CSB_{ABW}}{CSB_{SW1}}$
---------	------------------------------------

K2-Wert	$K2 = \frac{CSB_{STA}}{CSB_{SW1}}$
---------	------------------------------------

$K1/K2$	$K1/K2 = \frac{CSB_{ABW}}{CSB_{STA}}$
---------	---------------------------------------

Zur Datenauswertung werden weitere folgende Darstellungsmöglichkeiten und Arbeitsmethoden genutzt:

- Bilanzierung
- Profile
- Sankey-Diagramme
- Volumenanalyse
- Funktion der Stofffänger
- Lokalisierung und Quantifizierung von Rohstoffverlusten
- Bewertung von Frischwassereinsatz, Kreislaufschaltung und Abwasserausschleusung mit Kennwerten

3.1.3 Simulationsrechnungen

Simulationsrechnungen werden eingesetzt, um die Auswirkungen von Verbesserungsmaßnahmen zu quantifizieren und Optimierungspotenzial zu bestimmen. Für jede Anlage wird ein statisches Simulationssystem aufgebaut und parametrisiert, d. h. am Ist-Zustand kalibriert. Abgebildet wird jeweils der stationäre Betriebszustand bei stabiler Produktion. Die Modelle erlauben die Bilanzierung der Parameter Wassermenge, Feststoffe und CSB. Jedes Modell ist in Bilanzelemente unterteilt, die die Loops (Teilkreisläufe) der Stoffaufbereitungen und die Papiermaschinen repräsentieren.

4 Ergebnisse

4.1 Erfassung des Ist-Zustandes

Sortenbereiche und Produktionsmengen

Die untersuchten Papierfabriken deckten ein breites Spektrum an Spezialpapiersorten ab. Hauptsächlich wurden Sorten aus folgenden Bereichen produziert:

- Dekorpapier
- Feinpapiere
- Filterpapiere
- Tapetenrohpapier
- Kraftpapiere
- Technische Spezialpapiere
- Krepppapiere

Die Tagesproduktionen lagen im für kleine und mittlere Unternehmen typischen Bereich. Eine Zuordnung von Produktionsmengen und produzierten Sorten zu den Werken 1 bis 4 erfolgt aus Gründen der Vertraulichkeit nicht.

Struktur der Anlagen

Auf eine detaillierte Darstellung der Anlagentechnik in Teilsystemen muss aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet werden. Auf der Ebene, die hier betrachtet werden kann, sind die in Abb. 2 gezeigten Strukturen der Werke 2 bis 4 sehr ähnlich.

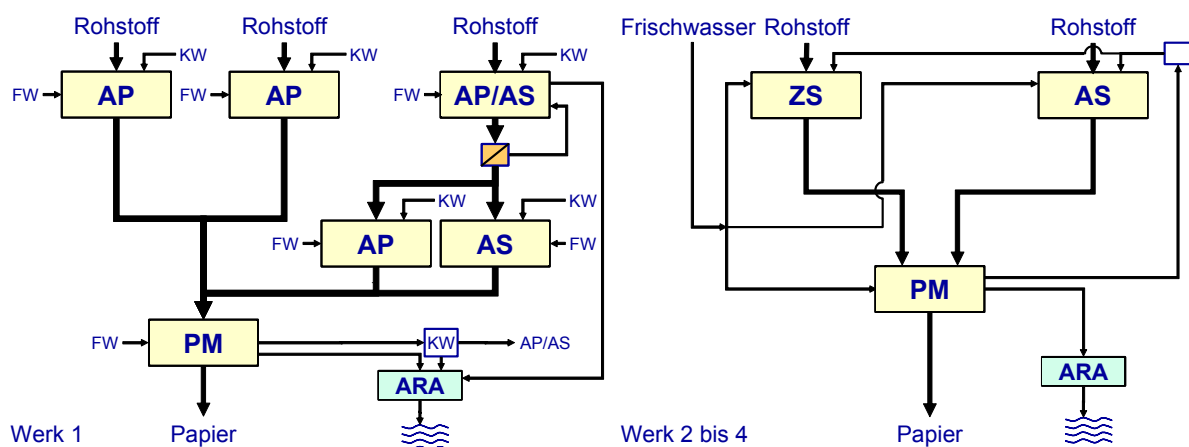


Abb. 2 Strukturen der untersuchten Anlagen

In Werk 1 ist die Schaltung der Wasserkreisläufe komplexer aufgebaut, da hier auch Altpapier als Rohstoff eingesetzt wird. Aufgrund der verschiedenen Altpapierqualitäten existieren mehrere Stoffaufbereitungslinien, die je nach Rezeptur parallel beschickt werden. In einer Linie erfolgt eine Eindickung mit dem Ziel, die Stoffdichte für eine Dispergierung zu erhöhen. Frischwasser wird sowohl in der Stoffaufbereitung als auch an der Papiermaschine eingesetzt. Die

Abwasserausschleusung erfolgt vorwiegend durch überlaufendes Klarwasser aus dem PM-Loop.

In den Werken 2 bis 4 werden als Rohstoffe Zellstoff, Kunststofffasern und Füllstoffe wie TiO_2 eingesetzt. Alle diese Anlagen haben neben der Stoffaufbereitungslinie für den Hauptrohstoff mindestens eine Linie zur Auflösung von Ausschuss. Eine Kreislauftrennung erfolgt nicht. Frischwasser wird sowohl in der Stoffaufbereitung als auch an der Papiermaschine eingesetzt. Die Abwasserausschleusung erfolgt vorwiegend durch überlaufendes Klarwasser. In einem Werk stellt auch das Dichtwasser der Wasserring-Vakuumpumpen einen hohen Anteil der Abwassermenge.

4.2 Auswertung

Bilanzierung

Im Rahmen der Bilanzierungen wurden für jedes Werk die spezifischen Abwassermengen und die Feststoffverluste ermittelt.

Profile

Mit der bewährten Profildarstellung lassen sich wertvolle Erkenntnisse zu verschiedenen Bereichen gewinnen: **CSB-Profile** ermöglichen einen Überblick über die aktuelle Belastung aller Bereiche des untersuchten Systems. Belastungsunterschiede lassen Rückschlüsse auf die Schaltung und die Wasserführung zu und helfen, Frischwasserverluste zu identifizieren. **Leitfähigkeitsprofile** sind insbesondere geeignet, um Verdünnungseffekte durch Frischwasser sichtbar zu machen. Das **pH-Wert-Profil** liefert wertvolle Aussagen zu den Auswirkungen anaerober Stoffwechselprozesse und den Auswirkungen von Hilfsmitteldosierungen. Dabei ist es häufig sinnvoll, auch Teilbereiche (z. B. Puffersysteme) genauer darzustellen.

Ein Beispiel der für alle Werke erstellten Belastungsprofile zeigt Abb. 3. Der hohe CSB-Wert im Ausschussstrang zeigt deutlich, dass durch den Ausschuss eine hohe spezifische CSB-Fracht eingetragen wird. Der CSB-Wert nimmt in Maschinenrichtung ab, eine Folge von Verdünnungseffekten durch zunehmenden Frischwassereinsatz. Der Wert des Abwassers ist im Vergleich mit Siebwasser 1 niedrig, da im Hauptkanal mehrere gering belastete Teilströme ausgeschleust werden.

Die Leitfähigkeit ist im ganzen System auf relativ hohem Niveau. Da bereits das Frischwasser einen Wert knapp $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ aufweist, sind Verdünnungseffekte anhand der Leitfähigkeit schlecht sichtbar. Das Profil ist sehr homogen und somit typisch für Anlagen ohne Kreislauftrennung. Die Leitfähigkeit steigt aufgrund Verwendung chemischer Additive in Richtung Siebwasser. Im Hauptkanal der Maschine fällt die Leitfähigkeit, da hier mehrere gering belastete Teilströme ausgeschleust werden.

Die pH-Werte bewegen sich in einem engen Bereich zwischen pH 7,0 und 7,3. Es sind keine starken pH-Sprünge vorhanden, die den Chemikalienhaushalt stören könnten. Der höhere pH-Wert im Hauptkanal kommt zustande, da hier mit Hilfsmitteln behandeltes Dichtwasser der Vakuumpumpen eingeleitet wird.

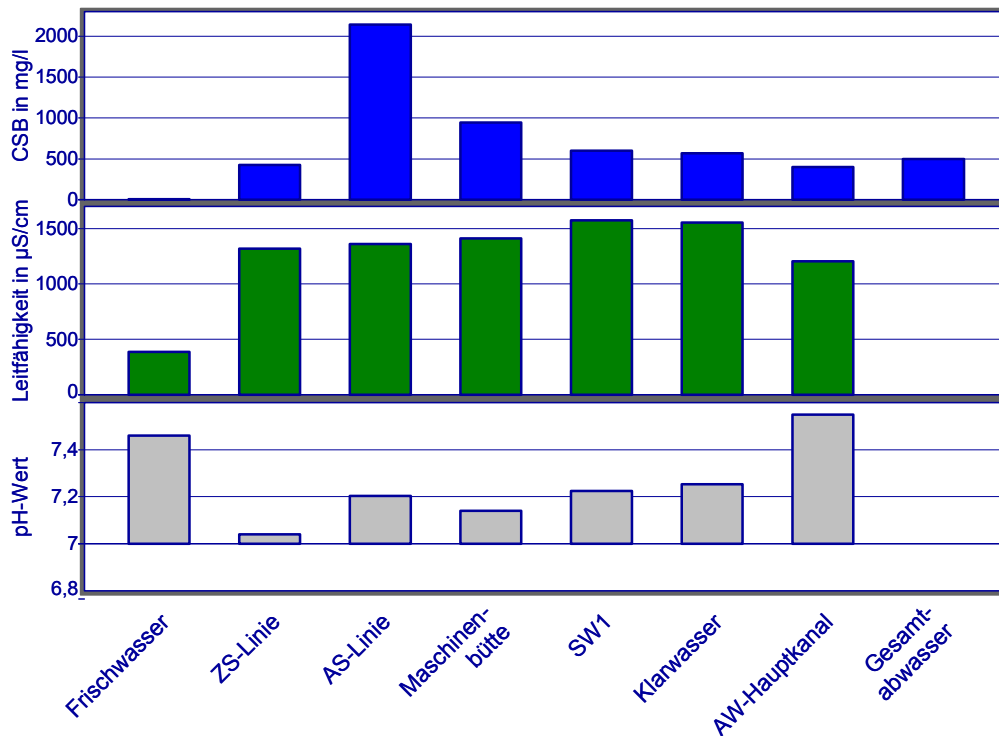


Abb. 3 Beispiel einer Profildarstellung aus einem untersuchten Werk

Sankey-Diagramme

Aufgrund des hohen Aufwands für die Erstellung wurden Sankey-Diagramme nur in vereinfachter Form erstellt, um die Verteilung des Frischwassers auf verschiedene Verbrauchskategorien darzustellen. Ein Beispiel ist in Kapitel 4.4 auf Seite **Fehler! Textmarke nicht definiert.** abgebildet.

Bewertung von Frischwassereinsatz, Kreislaufschaltung und Abwasserausschleusung

Die Bewertung wurde mit Hilfe der Kennwerte K_1 , K_2 , K_1/K_2 für alle Werke getrennt durchgeführt. Zur Anwendung kam für Werk 1 die erweiterte Kennwerttheorie aus dem Forschungsvorhaben AiF 10860 [6]. Für den Zielbereich der Werke 2 bis 4 wurden die von Kappen [8] definierten Zielwerte für die Produktgruppe „holzfreie Papiere“ angewandt.

Die K_1 -Werte belegen eine leicht unzureichende **Frischwassernutzung** in den Werken 2 und 3 sowie eine mangelhafte Frischwassernutzung in Werk 4, da sie kleiner 1 sind. Werk 1 weist einen deutlich höheren K_1 -Wert für das Gesamtsystem Stoffaufbereitung/Papiermaschine auf, der lokale K_1 -Wert für die Papiermaschine und deren Abwasser beträgt 0,9 und belegt somit geringe Frischwasserverluste.

Die **Kreislauftrennung** wird mit dem K_2 -Wert beurteilt. Der hohe Wert für Werk 1 belegt die vorhandene Kreislauftrennung im hoch belasteten Strang der Stoffaufbereitung. Die K_2 -Werte der Werke 2 bis 4 liegen im typischen Bereich für Anlagen ohne Kreislauftrennung.

Die **Gegenstromführung** in Werk 1 wird mit dem K_1/K_2 -Verhältnis beurteilt. Der niedrige Wert von 0,44 zeigt an, dass das Gegenstromprinzip nicht eingehalten wird. Dies bestätigte sich in der detaillierten Auswertung der Abwasserausschleusung: Das Abwasser fällt vorwiegend im Papiermaschinen-Loop an.

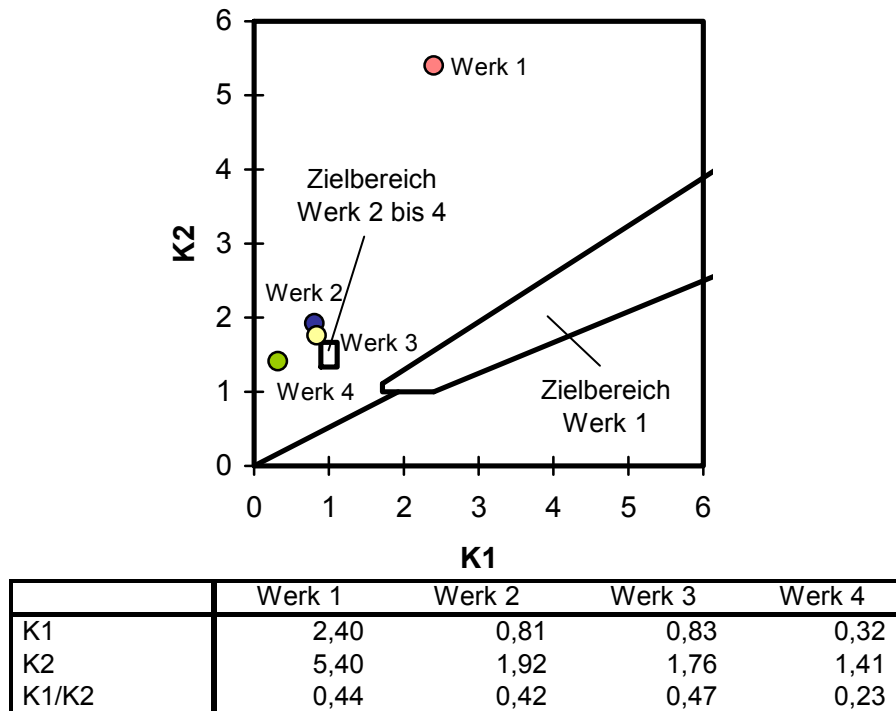


Abb. 4 Kennwerte der untersuchten Werke und Darstellung im K1-K2-Kennfeld

Volumenanalyse

Der Quotient von dynamisch genutztem Wasser- zu Stoffvolumen lag bei drei der untersuchten Werke im Untersuchungszeitraum oberhalb der Trendlinie. Eine nochmalige detaillierte Untersuchung nach Aufzeigen von Optimierungsmaßnahmen in den Werken 2 und 4 ergab für beide Werke identische Quotienten, nahezu exakt auf der Trendlinie. Die Aussage, dass in Werken, deren Quotient oberhalb der Pufferkurve liegt, die Puffervolumina zu groß bemessen sind, wird damit bestätigt.

In Werk 1 sind die Wasserpuffer nach Interpretation der Pufferkurve etwas zu groß dimensioniert. Im Vergleich zu den Werken 2 und 4 mit vergleichbarer Abwassermenge ist die Anlagenstruktur hier komplexer. Mehrere Stoffaufbereitungslinien müssen parallel mit Auflösewasser versorgt werden. Dieser Wasserbedarf kann jedoch über die Fahrweise der Stoffaufbereitungen beeinflusst werden. Das spezifische Ausschussvolumen von 0,12 m³/(t/d) ist niedrig, so dass ein eher geringer Pufferbedarf zur - nicht beeinflussbaren - Ausschussaflösung im Abrissfall besteht. In der Gesamtbewertung wurde daher das Volumen an Wasserpuffern als zu groß bewertet.

Der Quotient für Werk 3 liegt zwar unterhalb der Trendlinie und deutet zunächst auf fehlendes Puffervolumen hin. In der Tat wurde bei der Untersuchung festgestellt, dass ein Klarwasserpuffer bei Abriss mit Frischwasser ergänzt wird. Die Ursache dieser Ergänzung liegt jedoch in einer lokal ungünstigen Anordnung von Puffer und Pumpenvorlage und kann mit geringem Aufwand beseitigt werden. Insgesamt liegt in Werk 3 eine optimierte Wasserpuffernutzung vor, die nur bei einer Kreislaufeinengung zusätzliches Puffervolumen erfordert.

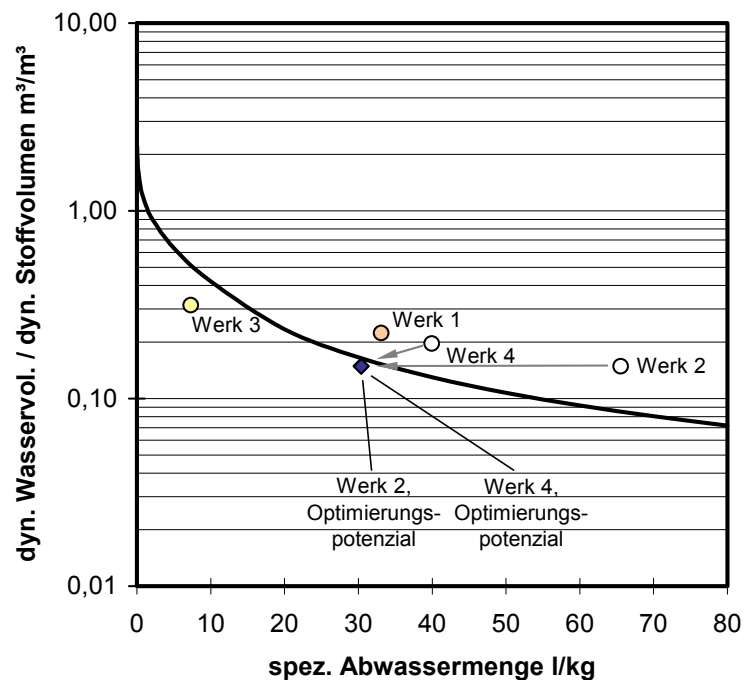


Abb. 5 Bewertung des Pufferbedarfs der vier Werke

Die spezifischen Gesamtvolumina sind von Werk zu Werk stark verschieden. Werk 1 und 2 weisen mit die höchsten Werte im Vergleich zu anderen Sortenbereichen auf, während in Werk 3 und 4 mit die niedrigsten Werte vorliegen. Bei der Berechnung von spezifischen, auf die Produktionsmenge bezogenen Werten sind Werk 1 und 2 allerdings strukturell benachteiligt, da hier die Produktionsmengen gering sind. In Werk 1 trägt die komplexere Anlagenstruktur mit mehreren Stoffaufbereitungslinien zum hohen Gesamtvolumen bei, während in Werk 2 die Eigenausschusslinie ein großes Volumen aufweist.

Die hier vorgestellte Volumenanalyse gibt einen qualitativen Hinweis, wie die Größe des gesamten Puffervolumens zu bewerten ist. Die Art und Weise, wie der Füllstand in Pufferbehältern in Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebszustand optimal zu regeln ist, wird derzeit im Forschungsvorhaben AiF 11696 „Optimales Rückwassermanagement in Papierfabriken durch Regelung mit Neuro-Fuzzy-Systemen“ untersucht.

Funktion der Stofffänger

In allen Werken werden Flotationen zur Kreislaufwasserreinigung eingesetzt. Die Klarwasserqualität war in allen Werken sehr gut, obwohl die Aggregate hinsichtlich hydraulischer oder Feststoffflächenbelastung teilweise an der Obergrenze arbeiteten. Werk 3 wies an einem Untersuchungstag eine ungewöhnlich schlechte Klarwasserqualität auf. Da nach Betreiberangaben üblicherweise deutlich bessere Werte erzielt werden, wird in nachstehender Tabelle nur die bessere Wasserqualität dargestellt. In Werk 4 wurden bei der Nachuntersuchung erhöhte Feststoffgehalte im Klarwasser vorgefunden, die zu erhöhten Feststoffverlusten führten. Die Ursachen konnten aufgeklärt werden, Vorschläge zur Verbesserung wurden unterbreitet.

Lokalisierung und Quantifizierung von Rohstoffverlusten

Die vorgefundenen Rohstoffverluste wurden in folgende Kategorien eingeteilt:

- Überlauf von Klarwasser
- Überlauf anderer Bütten
- Cleaner-Rejekte
- Vakuumpumpen Dichtwasser oder Saugerwasser
- Bodenabläufe
- Sortierrejekte an PM
- Sonstige

Die Kategorien beschreiben ausschließlich Stoffverluste mit dem Abwasser. Nennenswerte Verluste an trockenem Rohstoff oder Produkt wurden nicht beobachtet. Die Verteilung der Stoffverluste auf einzelne Quellen war in den Werken sehr unterschiedlich, wie Abb. 6 zeigt.

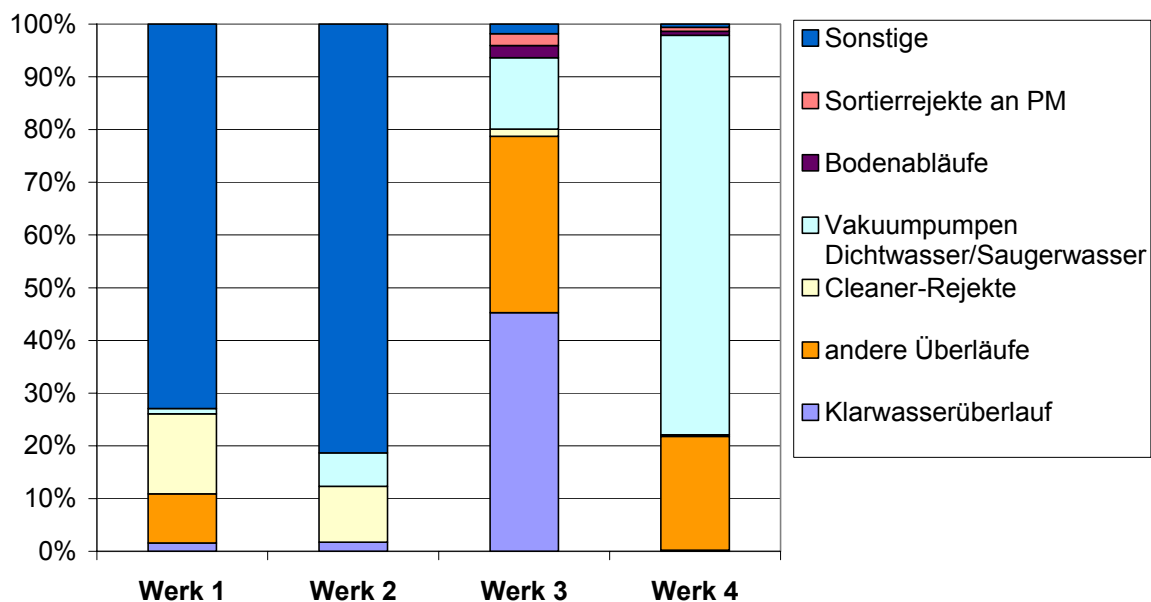


Abb. 6 Rohstoffverluste nach Gruppen

Bei jedem Werk dominieren andere Einflüsse. Werk 1 weist aufgrund des Rohstoffs Altpapier einen hohen Anteil an **Sortierrejekten** auf, der kaum verringert werden kann. Die Bedeutung eines feststoffarmen **Klarwassers** auf die Höhe der Stoffverluste zeigt sich bei Werk 3: Wie im Abschnitt „Funktion der Stofffänger“ beschrieben, wurde an einem Untersuchungstag eine ungewöhnlich schlechte Klarwasserqualität vorgefunden. Bezieht man diese in die Berechnung der Stoffverluste ein, so trägt das Klarwasser zu fast 50 % zu den Verlusten bei. Der Klarwasseranteil der anderen Werke ist aufgrund der guten Wasserqualität gering. **Cleaner-Rejekte** haben in allen Werken einen geringen Anteil an der Stoffausschleusung. Werk 1 hat mit Altpapier als Rohstoff den höchsten Anteil. Werk 2 konnte nach Optimierung den Anteil auf das Niveau der Werke 3 und 4 senken. Auffallend ist, dass in drei der vier Werke in nennenswertem Umfang Stoff aus **überlaufenden Behältern** verloren wird. Es handelte sich um Überläufe von Flotat-Behältern oder Pumpenvorlagebehältern für den Zulauf zu Stofffängern. Verluste dieser Art sollten nicht vorhanden sein und sind in der Regel mit wenig Aufwand zu vermeiden. Stoffhaltiges **Saugerwasser** oder **Dichtwasser** von Vakuumpumpen aus verschiedenen Saugzonen der Papiermaschine wird in allen Werken verworfen, meist jedoch in geringen Mengen.

Eine Ausnahme bildet Werk 4, wo diese Anfallstellen den Hauptteil der Stoffverluste ausmachen. An **Bodenabläufen** fallen kaum Stoffverluste an. Die Kategorie „**Sonstige**“ enthält für Werk 1 verschiedene nicht einzeln quantifizierbare Rejekte und Behälterüberläufe. In Werk 2 fällt in diese Kategorie hauptsächlich der Verlust von Stofffänger-Flotat, welches aus Gründen der Produktqualität nicht in den Prozess zurückgeführt werden kann.

4.3 Simulationsrechnungen

Für jedes Werk werden die Auswirkungen der vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen auf die CSB- und Salzbelastungen an der Papiermaschine prognostiziert. Bei kritischem Anstieg werden Gegenmaßnahmen entwickelt. Ergebnisse sind in Abb. 7 nachfolgend exemplarisch für ein Werk dargestellt. Zugrunde gelegt sind die in Tab. 1 genannten Ausgangszustände.

Tab. 1 Für ein Werk simulierte Szenarien

Szenario	Frischwassereinsatz	Kreislaufschaltung
Basis	Ist-Zustand bei Untersuchung	Ist-Zustand bei Untersuchung
Stufe 1	Reduzierter Frischwassereinsatz, minimierte Frischwasserverluste	Ist-Zustand bei Untersuchung
Stufe 2	Maximal reduzierter Frischwassereinsatz, minimierte Frischwasserverluste	Ist-Zustand bei Untersuchung
Stufe 3	Maximal reduzierter Frischwassereinsatz, minimierte Frischwasserverluste	Abwasserausschleusung konsequent aus dem höchstbelasteten Strang der Stoffaufbereitung
Stufe 4	Reduzierter Frischwassereinsatz, so dass Belastung der PM auf Basis-Niveau	Abwasserausschleusung konsequent aus dem höchstbelasteten Strang der Stoffaufbereitung

Die Ergebnisse zeigen, dass erwartungsgemäß bei einer Kreislaufeinengung ohne Optimierung der Schaltung zunächst alle CSB-Werte steigen (Stufe 1 und 2). Bei maximaler Kreislaufeinengung und konsequenter Gegenstromführung ist die CSB-Belastung an der Papiermaschine jedoch gegenüber dem Ausgangszustand noch erhöht (Stufe 3). Eine Entlastung der Papiermaschine auf das Ausgangsniveau gelingt nur, wenn der Kreislauf wieder geöffnet wird (Stufe 4). Eine weitergehende Kreislaufeinengung bei gleich bleibender Maschinenbelastung gelingt nur bei verbesserter Eindickung des Stoffs im höchstbelasteten Strang der Stoffaufbereitung oder bei Kreislaufentrennung auch für die niedriger belasteten Stränge der Stoffaufbereitung. Die in Abb. 8 gezeigte Entwicklung der Simulationsergebnisse im K1-K2-Kennfeld verdeutlicht, dass der Zielbereich erreicht werden kann. Dies gelingt jedoch nur bei optimierter Kreislaufführung.

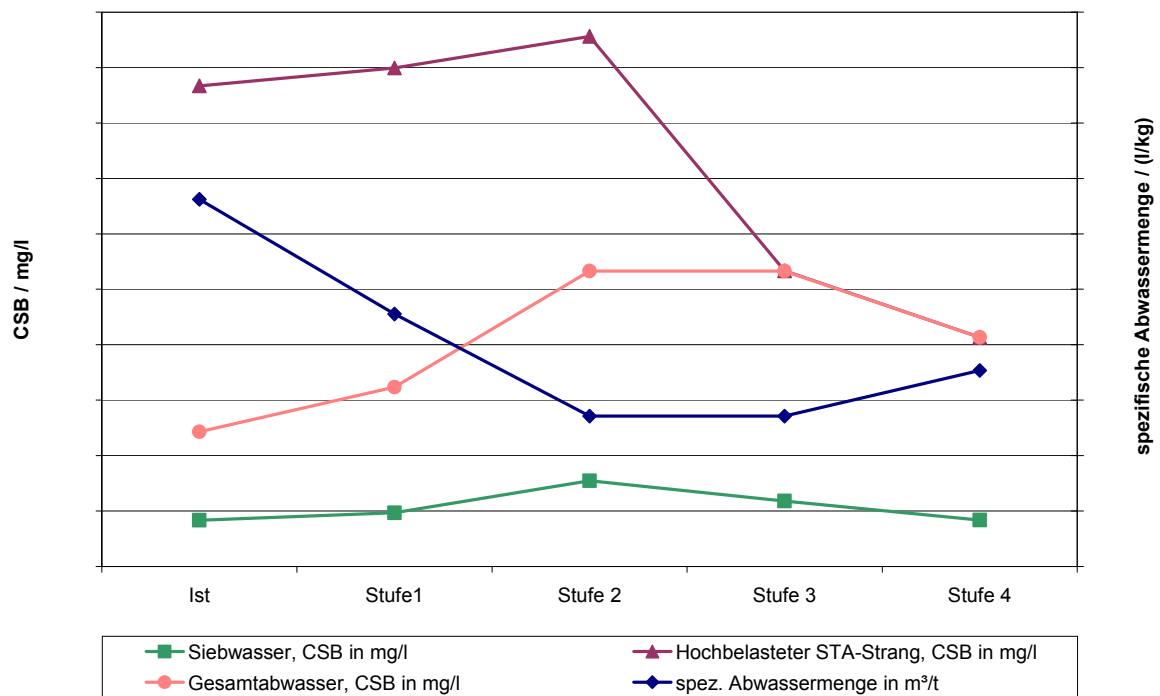


Abb. 7 Ergebnisse der Simulationsrechnungen aus einem Werk

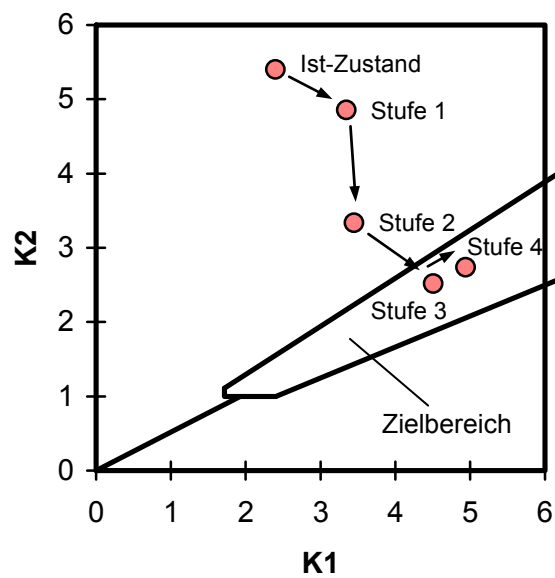


Abb. 8 Entwicklung der Simulationsergebnisse im K1-K2-Kennfeld

4.4 Optimierung und Reporterstellung

Für jedes Werk wurden Datenbasis, Ergebnisse und Simulationsrechnungen in einem Report mit ca. 45 Seiten Textteil (mit Grafiken) und 10 bis 30 Seiten Datenanhang dargestellt. Jeder Report enthält ein Maßnahmenportfolio mit jeweils 10 bis 20 Optimierungsmaßnahmen. Die grundlegenden Elemente eines Ergebnisreports sind in Tab. 2 gelistet.

Tab. 2 Elemente eines Ergebnisreports

Ist-Zustand der Wasserkreisläufe	
<ul style="list-style-type: none"> • Angaben zur Produktion • Frischwassereinsatz • Pufferkapazität 	<ul style="list-style-type: none"> • Belastung des Kreislaufwassers • Stofffänger und Eindicker • Abwasseranfall und Stoffverluste
Möglichkeiten zur Optimierung der Wasserkreisläufe	
<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung des Frischwassereinsatzes • Verbesserung der Kreislaufschaltung • Anpassen der Pufferkapazität • Optimierung der Stofffänger / Eindicker • Kennwerte zur Optimierung der Wasserkreisläufe 	<ul style="list-style-type: none"> • spezifische Abwassermenge im Vergleich • Stufenplan zur Minimierung der spezifischen Abwassermenge • Stufenplan zur Minimierung der Stoffverluste • Auswirkung der Optimierungen auf Systembelastung und K1-K2-Werte
Schlussfolgerungen und Empfehlungen	

Wie Abb. 9 und Abb. 10 zeigen, wurden erhebliche Potenziale zur Reduzierung von Frischwasserbedarf und Feststoffverlusten ermittelt. Zu beachten ist, dass der jeweils dargestellte „empfohlene Zustand“ nicht eine absolut ideale Situation beschreibt. Vielmehr ist diejenige Situation beschrieben, die auf Basis vorhandener Anlagentechnik mit geringen Umbauten und Investitionen erreicht werden kann.

Reduzierung der spezifischen Abwassermenge

Auffallend ist, dass in allen vier Werken Frischwasser zur **Stoffverdünnung** eingesetzt wurde: zur Stoffauflösung, zur Stoffdichteregulierung und als Ergänzung in Klarwasserpuffer. Der Einsatz von Frischwasser für diese Zwecke ist in der Regel nicht notwendig, entsprechend wurden für alle Werke entsprechende Maßnahmen vorgeschlagen. Auch an **Spritzrohren** wurde erhebliches Einsparpotenzial gefunden. Hier wurde häufig empfohlen, den Verbrauch von Spritzrohren mit gleicher Funktion aneinander anzugleichen oder Spritzrohre im Bereich der Siebpartie auf Klarwasser umzustellen. Für das **Dichtwasser von Vakuumpumpen** wurde in zwei Werken die Installation eines Dichtwasserkreislaufs empfohlen, um den Frischwasserbedarf zu senken. Überhöhter Verbrauch an **Sperrwasser** und **Frischwasserverluste** in den Kanalböten weitere Optimierungsansätze. Im Bereich Reinigung/Sonstige wurde die Umstellung von Frisch- auf Klarwasser empfohlen.

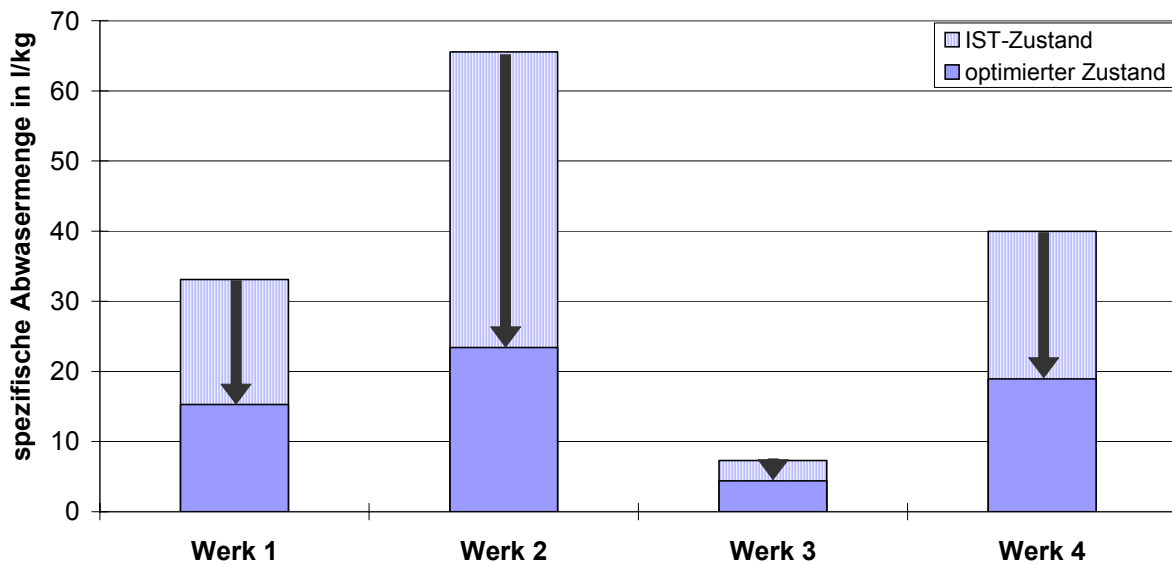


Abb. 9 Potenzial zur Reduzierung des Frischwasserbedarfs

Reduzierung von Feststoffverlusten

Im Bereich der Stoffverluste wurden Optimierungen in folgenden Bereichen vorgeschlagen:

- Überlauf von Behältern vermeiden
- Verbesserung der Klarwasserqualität
- Dichtwasser-Kreislauf für Vakuumpumpen installieren
- Rückführung von Saugerwasser
- Rejektmengen Cleaner reduzieren

Die Verteilung der ungenutzten Stoffmengen im empfohlenen Zustand zeigt Abb. 11: Werk 1 und 2 weisen eine Sonderstellung auf, da sie aus Qualitätsgründen eine bestimmte Stoffmenge ausschleusen müssen. Diese Menge wird in der Abbildung dem Bereich „Sonstige“ zugeordnet. Überläufe von Behältern sollten vollständig unterbunden werden. Sortierrejekte an der Papiermaschine fallen nur noch in geringem Umfang am Wuchtschüttler an. Tropfwasser im Bereich der Siebpartie kann häufig mit geringem Aufwand ins Siebschiff geführt werden, statt in einen Bodenablauf. Die allgemeine Rückführung von Bodenabläufen wurde aufgrund des schlechten Aufwand/Nutzen-Verhältnisses nicht empfohlen. Gleiches gilt für die verbleibenden Anteile an Vakuumpumpen-Dichtwasser bzw. Saugerwasser. Cleaner-Rejekte und Klarwasser tragen im empfohlenen Zustand ebenfalls nur wenig zu Stoffverlusten bei. Der Anteil an Klarwasser im empfohlenen Zustand von Werk 3 ist scheinbar hoch. Der Wert beruht jedoch auf einem angenommenen Gehalt an abfiltrierbaren Feststoffen von 100 mg/l, der meist unterschritten wird. Zudem ist auch der gesamte Stoffverlust in diesem Werk auf äußerst niedrigem Niveau, so dass notwendigerweise das Klarwasser als hauptsächlicher Abwasserteilstrom einen größeren Anteil einnimmt.

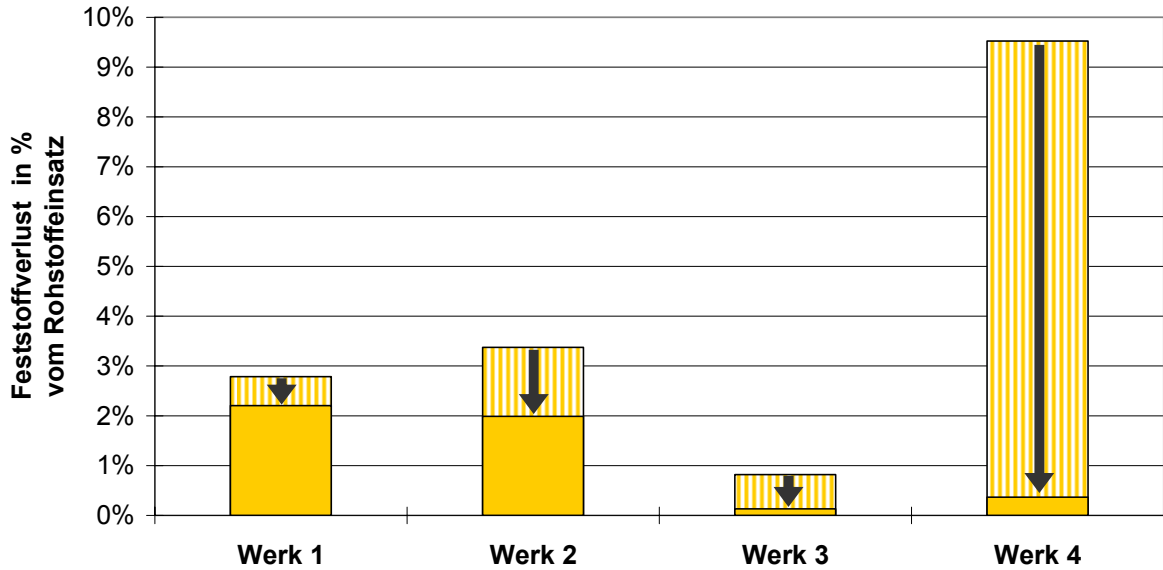


Abb. 10 Potenzial zur Reduzierung der Feststoffverluste

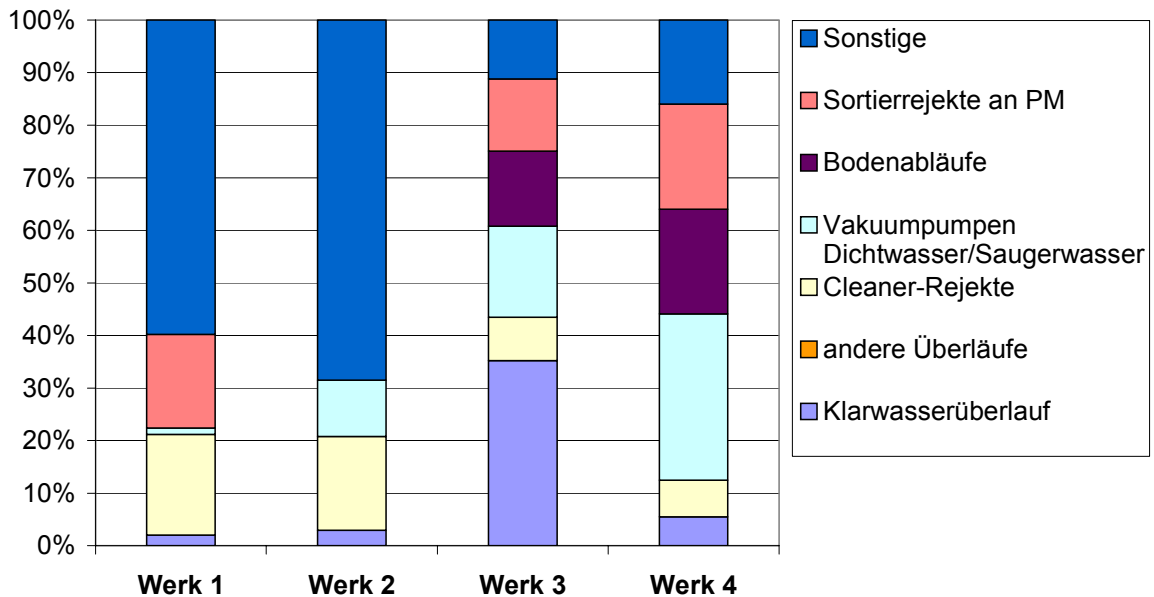


Abb. 11 Gruppierte Rohstoffverluste im empfohlenen Zustand

4.5 Verifizierung des Optimierungspotenzials

In zwei Werken wurden detaillierte Nachuntersuchungen zur Verifizierung der Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. In einer Systemaufnahme vor Ort wurden wesentliche Stellen noch einmal beprobt und relevante Volumenströme im Frisch- und Abwasserbereich nochmals aufgenommen. Die anderen Werke wurden hinsichtlich ihres Einsparpotenzials befragt.

Es zeigt sich, dass insbesondere in Werk 2 mit den vorgeschlagenen Maßnahmen erhebliche Einsparungen realisierbar sind: Die spezifische Abwassermenge kann langfristig um ca. 35% reduziert, die Stoffverluste können um 15 bis 20 % gesenkt werden. Werk 4 besitzt ein Einsparpotenzial bezüglich der spezifischen Stoffverluste um ca. 50%. In Werk 3 lassen sich aufgrund der guten Ausgangslage nur geringe Verbesserungen ermitteln. Werk 1 erwartet über über kurzfristig realisierbare Einsparpotenziale hinaus langfristig weitere deutliche Reduzierungen beim Frischwassereinsatz.

4.6 Aufstellung allgemeiner Kriterien

Regeln zur Reduzierung von Abwassermenge und Stoffverlusten

Wesentliche Ansätze zur Reduzierung der Abwassermenge mit Beispielen und Optimierungsmaßnahmen fasst Tab. 3 zusammen.

Tab. 3 Ansätze zur Reduzierung der Abwassermenge

Sorgsamer Umgang mit Frischwasser	
Beispiele	Überläufe von (Warm-)Wasserbehältern
	Überflüssige Schläuche zum Reinigen/Spülen
	Leckagen
	Kühlwasserverluste ins Abwasser
Maßnahmen	Personal schulen und sensibilisieren
Reduzierung von Wasserverbrauchern	
Beispiele	Frischwassergänzungen ins Klarwasser
	Angleichung von Verbrauchern mit gleicher Funktion (Spritzrohre)
	Dichtwasserkreislauf für Wasserring-Vakuumpumpen
	Sperrwasser
	Chemikalienansatz
Maßnahmen	Verbrauche identifizieren und reduzieren
Ersatz von Frischwasser durch andere Wasserqualitäten	
Beispiele	Stoff auflösen
	Konsistenzregelungen
	Schaumzerstörungen
	Bahnabschlag
	Einzelne Sieb-Spritzrohre
	Vakuumpumpen
Maßnahmen	Verbraucher identifizieren und z. B auf Klarwasser umstellen

Weitere Möglichkeiten zur Reduzierung der Abwassermenge bestehen durch Verringerung des Wasserbedarfs bei diskontinuierlichen Vorgängen. Beispielsweise wird bei Sortenwechseln häufig Kreislaufwasser verworfen, da störende Farben oder Chemikalien im Wasser vorliegen. Abhilfe kann hier mit weitergehenden Reinigungsverfahren wie Ozonierung, Membranfiltration oder Eindampfung geschaffen werden.

Ansätze zur Reduzierung der Feststoffverluste sind in Tab. 4 beschrieben.

Tab. 4 Ansätze zur Reduzierung der Feststoffverluste

Sorgsamer Umgang	
Beispiele	Überläufe vermeiden
	Leckagen beseitigen
Maßnahmen	Personal schulen und sensibilisieren
Feststoff im System halten	
Beispiele	Tropfwasser an Nasspartie
	Schaberwasser
	Dichtwasser von Vakuumpumpen
	Saugerwasser
	Auffangwannen an Sieb-/Pressenpartie
Maßnahmen	In den Kreislauf zurückführen, z B. in SW2 und mechanische Reinigung über vorhandene Stofffänger, Bogensiebe, ...
Reduzierung von Anfallstellen	
Beispiele	Rejekte
	Klarwasser
Maßnahmen	Nachsortieren, bzw. bei Rejektomaten Taktzeiten erhöhen Klarwasserqualität durch Stofffängeroptimierung verbessern

Entwicklung und Anpassung von Kennwerten

Die im Forschungsvorhaben AiF 9584 [5] vorgestellte und in den Vorhaben AiF 10860 [6] und AiF 13093 [7] weiter entwickelte **Kennwerttheorie** mit den Werten K_1 , K_2 und $K^1_{/K_2}$ wurde auch in diesem Forschungsvorhaben angewandt. In Kapitel 4.3 wurde gezeigt, dass der Arbeitspunkt von Werk 1 im K_1/K_2 -Kennfeld nach Durchführung von Optimierungsmaßnahmen genau in den Zielbereich geführt werden kann. Gleiches wurde in den Berichten an die Papierfabriken für die Arbeitspunkte der Werke 2 bis 4 nachgewiesen. Die entwickelte Kennwerttheorie ist damit auch für Spezialpapierfabriken anwendbar.

Cleaner-Rejekte müssen in allen Werken ausgeschleust werden. Die Mengen sind prinzipiell abhängig von Sortiertechnologie, Rohstoff und Papiersorte. Die Unterschiede in diesen Bereichen sind bei der Herstellung von Spezialpapieren enorm. Ein gemeinsamer Benchmarkwert für alle Spezialpapierhersteller kann daher nicht aufgestellt werden. Da die Verlustraten in den Werken 2 bis 4 mit Papier vorwiegend auf Zellstoffbasis jedoch sehr ähnlich sind (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), wird folgender Anhaltswert vorgeschlagen:

$$\frac{\text{Cleaner - Rejekt}}{\text{Bruttoproduktion}} < 0,2\%$$

Klarwasser stellt den höchsten Anteil an der Abwassermenge. Die Feststoffkonzentration im Klarwasser sollte 100 mg/l nicht überschreiten. Mit der idealisierten Annahme, dass das Abwasser zu 100% aus Klarwasser besteht, ergibt sich für Stoffverluste durch überlaufendes Klarwasser folgender Anhaltswert:

$$FS_{KW} < \frac{AW_{spez}}{100} \%$$

mit FS_{KW} Feststoffaustrag mit Klarwasser
 AW_{spez} spezifische Abwassermenge in m³/t

Schaltungsvorschlag zur Entlastung von Stofffängern

Bei der Herstellung von Dekorpapier besteht die Besonderheit, dass das Kreislaufwasser stark aschehaltig ist. Die hohe Aschefracht kann zur Überlastung von Flotationen führen und so eine schlechte Klarwasserqualität verursachen. Eine kaskadierte Wasserführung im Bereich Siebwasser 2 kann dies vermeiden. Wird hoch belastetes Wasser zum Behälter mit niedriger belastetem Wasser geführt, werden die stark feststoffhaltigen Ströme im konstanten Teil gehalten, während der Stofffänger entlastet wird. Dieser Effekt kommt besonders bei stark gefüllten Papieren zum Tragen, kann jedoch prinzipiell auch für andere Sorten angewendet werden, wenn der Stofffänger überlastet ist.

4.7 Zusammenführung mit den Ergebnissen der Forschungsvorhaben AiF 9584, AiF 10860 und AiF 13093

Nachfolgend werden die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens mit den Untersuchungsergebnissen aus vorangegangenen Forschungsvorhaben zur Wasserkreislaufoptimierung in den Bereichen Produktion mit integrierter Altpapierstofferzeugung (AiF 9584 [5]), Produktion mit integrierter Holzstofferzeugung (AiF 10860 [6]) und Erzeugung holzfreier Papiere (AiF 13093 [7]) verglichen. Die in den vier Forschungsvorhaben untersuchten Sortenbereiche unterscheiden sich wesentlich in der Komplexität der Anlagenstruktur und in der Bandbreite der jeweils produzierten Papiersorten.

Die im Forschungsvorhaben AiF 9584 untersuchten Werke produzierten ein sehr breites Spektrum von Wellpappenroh papier über mehrlagige Kartons bis hin zu Druck- und Kopierpapieren auf reiner Altpapierbasis. Diese Anlagen wiesen sehr unterschiedliche Schaltungen im Wasserkreislauf auf. Untersucht wurden sehr einfache Anlagen mit nur einer Stoffaufbereitung und einer Papiermaschine, bis hin zu Anlagen mit mehreren Stoffaufbereitungslinien, teilweise mit integrierter Deinkingstufe und mehreren Papiermaschinen.

Die im Forschungsvorhaben AiF 10860 untersuchten Werke mit integrierter Holzstofferzeugung reichten von Anlagen mit nur einer Papiermaschine und einer zusätzlichen Zellstoffaufbereitung bis hin zu Systemen mit zwei Papiermaschinen und 2-Loop-Deinkinglinien. In den Anlagen zur Holzstofferzeugung kamen dabei unterschiedliche Bleichtechniken mit und ohne Waschstufen zum Einsatz.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Anlagen waren die im Forschungsprojekt AiF 13093 untersuchten Anlagen zur Erzeugung holzfreier Papier sehr homogen aufgebaut. Unterschiede bestanden nur in der Anzahl der Stoffaufbereitungs- und Ausschusslinien. Zusätzlich wurden in zwei der vier Anlagen gestrichene Papiere erzeugt.

Drei der in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Spezialpapierwerke sind einfache Anlagen ohne Kreislaufftrennung, die strukturell sehr ähnlich sind (siehe Kapitel 4.1). Diese Anlagen haben neben der Stoffaufbereitungslinie für den Hauptrohstoff mindestens eine Linie zur Auflösung von Ausschuss. Als Rohstoffe werden Zellstoff, Kunststofffasern und Füllstoffe wie TiO_2 eingesetzt. Ein Werk ist jedoch deutlich komplexer aufgebaut, da hier in mehreren Stoffaufbereitungslinien Altpapier und gelegentlich Zellstoff verarbeitet wird. In einer Linie erfolgt eine Eindickung.

Abwasseranfall und Optimierungspotenzial

In Abb. 12 sind die mittleren spezifischen Abwassermengen und das Optimierungspotenzial der in den vier Forschungsvorhaben untersuchten Papierfabriken gegenübergestellt.

Dargestellt sind die über die Bruttoproduktionsmenge gewichteten Mittelwerte. Die durchschnittliche spezifische Abwassermenge der Werke zur Produktion holzfreier Papiere liegt mit 10,7 l/kg unter der durchschnittlichen Abwassermenge der Werke zur Produktion AP-haltiger Papiere (11,8 l/kg). Zu berücksichtigen ist, dass die Untersuchungen im Bereich „AP-haltig“ in den Jahren 1993 bis 1995 durchgeführt wurden. Seit dieser Zeit hat sich der Wassereinsatz bei der Produktion „AP-haltiger“ Papiere weiter verringert. Etwas höher liegt der Durchschnitt der Werke zur Produktion holzhaltiger Papiere mit 12,6 l/kg. Die mit Abstand höchsten spezifischen Abwassermengen (gewichteter Mittelwert: 23,3 l/kg) treten im Sortenbereich „Spezialpapiere“ auf. Auch im optimierten Zustand liegt die mittlere spezifische Abwassermenge noch deutlich über den anderen drei Sortenbereichen. Im Spezialpapierbereich sind häufig strukturelle Nachteile wirksam, die eine erhöhte spezifische Abwassermenge bewirken, wie z. B. ältere und schmale Papiermaschinen, geringe Produktionsmengen und häufigere Sortenwechsel.

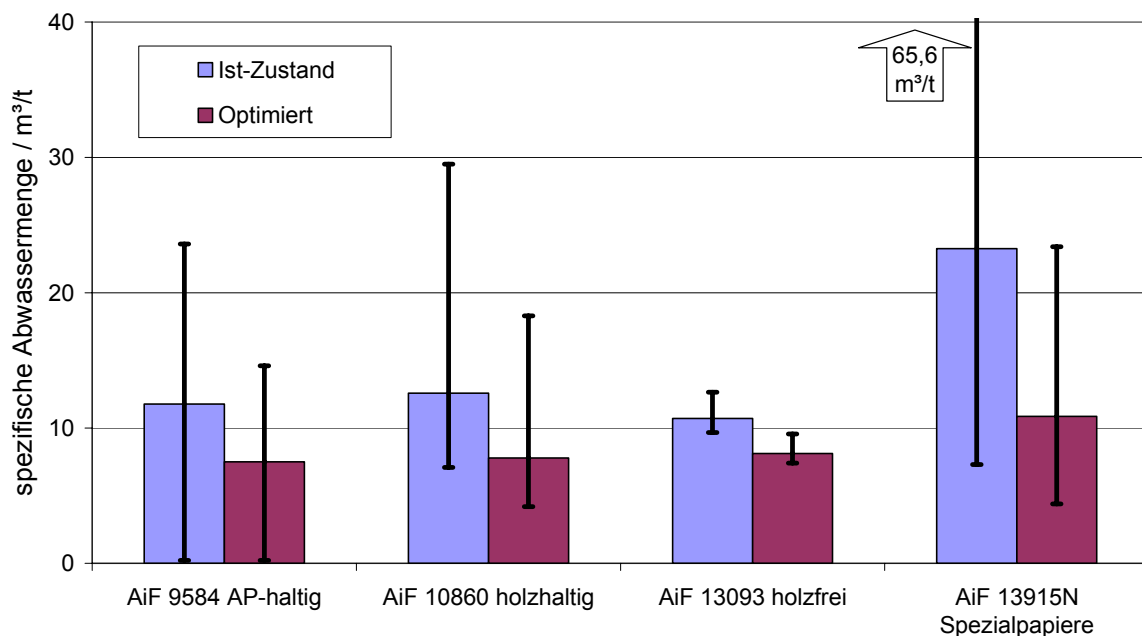


Abb. 12 Vergleich der spezifischen Abwassermengen im Ist-Zustand und im optimierten Zustand: Über Produktionsmenge gewichteter Mittelwert und Spanne der in den jeweiligen Forschungsvorhaben untersuchten Werke

Sehr große Unterschiede zeigen sich in den Bandbreiten bezüglich der Abwassermengen und der entsprechenden Einsparpotenziale der untersuchten Werke. Während sich in den Sortenbereichen „AP-haltig“, „holzhaltig“ und „Spezialpapiere“ sehr große Schwankungen sowohl in der spezifischen Abwassermenge als auch in den gefundenen Einsparpotenzialen (Tab. 5) ergaben, liegen die Werke zur Produktion holzfreier Papiere in einem sehr engen Bereich. Dies resultiert aus der großen Ähnlichkeit der Anlagen. Bei den untersuchten Werken im Sortenbereich „Spezialpapiere“ ergaben sich aufgrund des hohen aktuellen Wasserverbrauches im Mittel mit 47 % die höchsten Einsparpotenziale. Weitere Möglichkeiten zur Einsparung bestehen hier durch die Nachreinigung von Kreislaufwasser durch Feinfiltration bis hin zu weitergehenden Reinigungsverfahren, wie z. B. Ozon-, Membranverfahren. Diese Verfahren können auch eine Entfärbung und Störstoffelimination bewirken und ermöglichen damit die Wiederverwendung von Kreislaufwasser nach Sortenwechseln.

Tab. 5 Mittel-, Minimal- und Maximalwerte der gefunden Einsparpotenziale der in den Forschungsvorhaben untersuchten Werke, gewichtet nach Produktionsmengen

Einsparpotenzial	AiF 9584 AP	AiF 10860 holzhaltig	AiF 13093 holzfrei	AiF 13915N Spezial
Mittel	36%	38%	24%	47%
Max	54%	56%	28%	64%
Min	0%	8%	19%	40%

Siebwasserbelastung

Abb. 13 zeigt die Belastung des Siebwassers der untersuchten Papierfabriken anhand der Mittelwerte und Bereiche für CSB, Leitfähigkeit und Chloridgehalte.

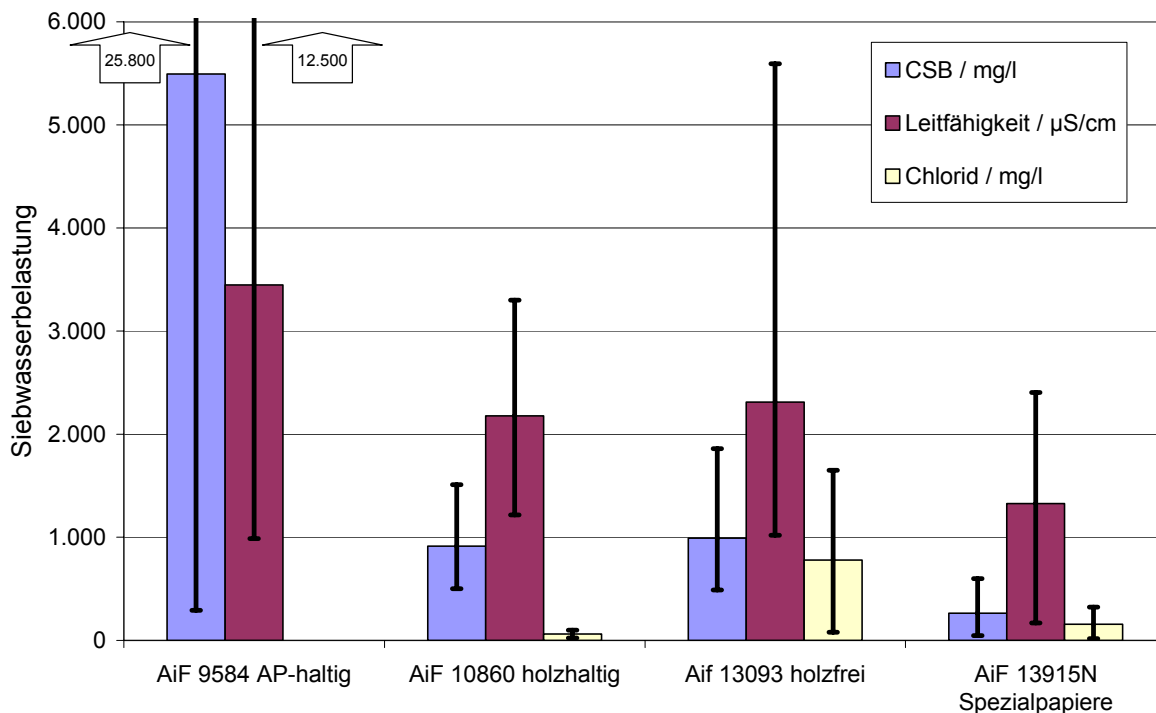


Abb. 13 Vergleich der Siebwasserbelastung im Ist-Zustand der untersuchten Werke: Mittelwert und Spanne von CSB, Leitfähigkeit und Chloridgehalt (Chloridgehalt in AiF 9584 nicht erfasst).

Die Belastung des Siebwassers im Sortenbereich „Spezialpapiere“ ist verglichen mit den anderen drei untersuchten Sortenbereichen mit Abstand am geringsten. Gründe hierfür sind die deutlich höhere spezifische Frischwassermenge und der zumindest in drei der untersuchten Werke geringe CSB-Eintrag durch die eingesetzten Rohstoffe (überwiegender Einsatz von Zellstoff). Im Werk 1 erfolgt durch die installierte Kreislauftrennung eine Entlastung des Papiermaschinenkreislaufes.

Die **CSB-Belastung** im Siebwasser bei der Produktion holzhaltiger holzfreier Papiere liegt in einem ähnlichen Bereich. Die wesentlich höheren Belastungen im Siebwasser der Fabriken zur Produktion von AP-haltigen Papieren sind durch die zum Teil sehr niedrigen spezifischen Abwassermengen und durch die hohen spezifischen CSB-Einträge mit dem Altpapier zu erklären. Zusätzlich kann der CSB-Eintrag mit dem Altpapier je nach verwendeter AP-Qualität stark schwanken. Dies führt zu insgesamt sehr unterschiedlichen Belastungsniveaus in den einzelnen Anlagen.

Die **Chloridbelastung** in den untersuchten Werken zur Herstellung von Spezialpapieren schwankt aufgrund der eingesetzten Chemikalien und der Vorbelastung des Frischwassers. In einem Werk werden Werte erreicht, bei denen bereits Lochfraß und Spaltkorrosion an Edelstählen auftreten können. Die sehr hohe Belastung mit Chlorid und Leitfähigkeit im Siebwasser im Sortenbereich holzfreier Papiere ist durch den Einsatz von Nassfestmitteln und Farbstoffen in einem der untersuchten Werke bedingt.

K-Werte

In Abb. 14 sind die K1- und K2-Werte aller Werke der vier Forschungsvorhaben in ein Kennfeld eingetragen. Der angegebene Zielbereich dient nur der Orientierung und entspricht dem Zielbereich für einfache Schaltungen mit Kreislauftrennung. Die drei strukturell einfachen Werke zur Produktion von Spezialpapieren bilden eine vergleichsweise homogene Gruppe. Werk 1 liegt aufgrund der komplexeren Struktur und der installierten Kreislauftrennung deutlich außerhalb dieser Gruppe.

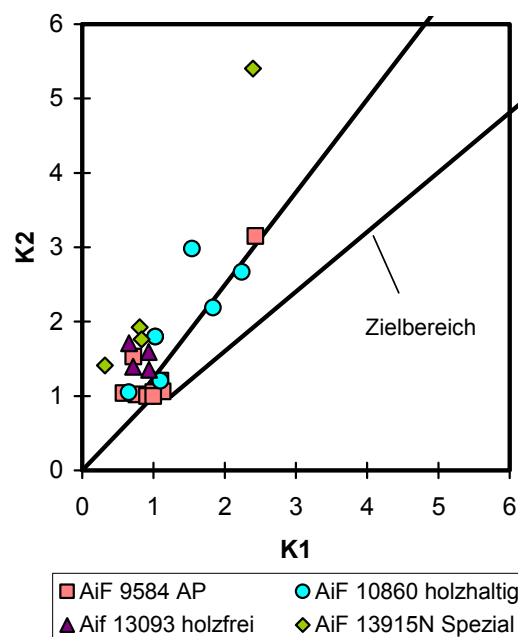


Abb. 14 K-Werte der Einzelanlagen aus den Forschungsvorhaben AiF 9584, AiF 10869, AiF 13093 und AiF 13915N im K1-K2-Kennfeld

Ebenfalls bedingt durch die ähnliche Anlagenstruktur liegen die Werke zur Erzeugung holzfreier Papiere auch in einem engen K-Werte-Bereich. Im Gegensatz dazu ist im Sortenbereich der holzhaltigen Papiere der Unterschied zwischen den einzelnen Anlagen wesentlich ausgeprägter. In einigen Anlagen ist eine Gegenstromführung oder zumindest eine Kreislauftrennung zwischen Schleiferei und Papiermaschine verwirklicht. Kreislauftrennung ohne Gegenstromführung führt zu hohen K2-Werten, der K1-Wert bleibt dabei niedrig. Mehr-Loop-Deinkinganlagen weisen verfahrensbedingt eine Kreislauftrennung zwischen den einzelnen Deinking-Loops auf. Kombiniert mit einer Gegenstromführung führt dies sowohl zu hohen K1- als auch zu hohen K2-Werten. Der K2-Wert der Anlagen zur Produktion holzfreier Papiere wird durch den Einsatz hoher Frischwassermengen an der Papiermaschine erhöht. Im Gegensatz dazu ist der niedrige K2-Wert der Anlagen zur Produktion von AP-haltigen Papieren durch eine gleichmäßige Verteilung des Frischwassereinsatzes im gesamten Prozess bedingt.

5 Schlussfolgerungen

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass bei der Erzeugung von Spezialpapier der Abwasseranfall reduziert und gleichzeitig die Rohstoffausbeute erhöht werden kann, wenn eine Optimierung des Wasserkreislaufsystems erfolgt.

In den vier untersuchten Werken wurden Einsparpotenziale zur Reduzierung der spezifischen Abwassermenge zwischen 40% und 64% ermittelt. Die im Vorfeld aufgrund von K1-Werten vermuteten Potenziale konnten bestätigt werden. Dies lässt den Schluss zu, dass auch in anderen Werken signifikante Einsparpotenziale bestehen. Auch im optimierten Zustand liegt die mittlere spezifische Abwassermenge bei der Produktion von Spezialpapieren noch deutlich über der in anderen Sortenbereichen. Im Spezialpapierbereich sind häufig strukturelle Nachteile wirksam, die eine erhöhte spezifische Abwassermenge bewirken, wie z. B. ältere und schmale Papiermaschinen, geringe Produktionsmengen und häufigere Sortenwechsel. Dennoch sind auch sehr niedrige Abwassermengen möglich, falls konsequent auf gutes Wassermanagement geachtet wird. Die niedrigste vorgefundene Abwassermenge von 7,3 m³/t zeigt dies. Als Benchmark für andere Spezialpapierwerke ist dieser Wert aufgrund der starken Unterschiede in Produkt und Produktionstechnik nur bedingt geeignet. Auffallend war, dass in allen vier Werken unnötigerweise Frischwasser zur Stoffverdünnung eingesetzt wurde. Überhöhter Frischwasserverbrauch wurde in den Bereichen Stoffverdünnung, Spritzrohre, Sperrwasser und Dichtwasser von Vakuumpumpen ermittelt. Außerdem traten Frischwasserverluste in den Kanal auf und Frischwasser wurde für Verbraucher verwendet, die auch mit Klarwasser bedient werden können.

Bei Rohstoffverlusten wurden ebenfalls teils erhebliche Einsparpotenziale gefunden, die Unterschiede waren mit Werten zwischen 21% und 84% ausgeprägt. Die niedrigste vorgefundene Verlustrate lag bei 0,8% (Feststoffaustrag mit dem Abwasser bezogen auf Bruttoproduktion). Als wesentlich für die Reduzierung von Rohstoffverlusten erwies sich das Vermeiden des Überlaufens von Behältern und die Sicherstellung einer guten Klarwasserqualität mit Feststoffgehalten von weniger als 100 mg/l. Weiteres Potenzial lag in der Installation von Dichtwasser-Kreisläufen für Vakuumpumpen, der Rückführung von Saugerwasser und der Reduzierung von Rejektmengen an der letzten Cleanerstufe.

Die Anwendbarkeit der in früheren Forschungsvorhaben für andere Sortenbereiche entwickelten K-Wert-Theorie wurde für den Sortenbereich Spezialpapiere bestätigt, so dass auch hier mit geringem messtechnischen Aufwand ein Abschätzen von Optimierungspotenzialen möglich ist. Gleiches gilt für die Methode der Volumenanalyse zur Bewertung der Puffervolumina.

Die Leistung der als Stofffänger eingesetzten Flotationsanlagen war in allen Werken gut, obwohl die Aggregate hinsichtlich hydraulischer oder Feststoffflächenbelastung teilweise an der Obergrenze arbeiteten. Eine Überlastung von Flotationen kann zu einer schlechten Klarwasserqualität führen. Es wurde ein Schaltungsvorschlag unterbreitet, bei dem im Bereich Siebwasser 2 hoch belastetes Wasser zum Behälter mit niedriger belastetem Wasser geführt wird. Somit werden die stark feststoffhaltigen Ströme im Konstanten Teil gehalten, während der Stofffänger entlastet wird. Dieser Effekt kommt besonders bei stark gefüllten Papieren zum Tragen, ist jedoch prinzipiell auf andere Sorten übertragbar.

Wesentliche Ansätze zur Optimierung mit Beispielen wurden für folgende Bereiche genannt:

Reduzierung der Abwassermenge	Reduzierung der Feststoffverluste
Sorgsamer Umgang mit Frischwasser	Sorgsamer Umgang
Reduzierung von Wasserverbrauchern	Feststoff im System halten
Ersatz von Frischwasser durch andere Wasserqualitäten	Reduzierung von Anfallstellen

Für die Feststoffverluste an Cleanern und mit ausgeschleustem Klarwasser werden folgende Richtwerte aufgestellt:

$$\frac{\text{Cleaner - Rejekt}}{\text{Bruttoproduktion}} < 0,2\%$$

$$FS_{KW} < \frac{AW_{spez}}{100} \%$$

mit FS_{KW} Feststoffaustrag mit Klarwasser ins Abwasser
 AW_{spez} spezifische Abwassermenge in m^3/t

Zur Reduzierung von spezifischer Abwassermenge und Stoffverlusten wird die in Kapitel 3 „Material und Methoden“ beschriebene Vorgehensweise empfohlen.

Die Anwendbarkeit der entwickelten Vorgehensweise und der Transfer der vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen ist gegeben, da für alle untersuchten Werke die Anwendbarkeit zahlreicher Optimierungsmaßnahmen verifiziert wurde. Beispielsweise konnte für ein Werk nachgewiesen werden, dass eine nachhaltige Reduzierung der spezifischen Abwassermenge von ca. 35% möglich ist. Bezüglich der Stoffverluste ist eine anhaltende Reduzierung um 15 bis 20% möglich.

Die notwendige systematische Vorgehensweise zur Einengung der Wasserkreisläufe in Spezialpapierfabriken auf das niedrigste technisch machbare Niveau der Abwassermenge und Bewertungsmaßstäbe dazu, wurden in diesem Forschungsvorhaben erarbeitet. Die Anwendbarkeit der in früheren Forschungsvorhaben entwickelten Werkzeuge und Kennwerte zur Beurteilung von Wasserkreisläufen wurde für Spezialpapiere bestätigt und um neue Kennwerte zur Beurteilung von Rohstoffverlusten mit dem Abwasser erweitert.

Weiterführender Forschungsbedarf eröffnet sich dadurch, dass im Spezialpapierbereich teilweise erhöhter Frischwasserbedarf durch häufige Sortenwechsel besteht. Kreislaufwasser muss verworfen werden, da störende Farben oder chemische Additive vorliegen. Möglichkeiten zur Wassereinsparung bestehen hier durch die Nachreinigung von Kreislaufwasser durch weitergehende Reinigungsverfahren, wie z. B. Ozon-, oder Membranverfahren. Über die Zuverlässigkeit mit der chemische Additive mit diesen Verfahren unwirksam gemacht werden können, liegen bisher keine gesicherten Erkenntnisse vor.

6 Anwendung und wirtschaftliche Bedeutung

Gelingt es, die Abwassermenge zu reduzieren, können bestehende Abwasserreinigungsanlagen hydraulisch entlastet oder Neuanlagen kleiner ausgelegt werden. Die Kosten für die Entnahme und Aufbereitung von Frischwasser werden verringert. Werden Rohstoffverluste mit dem Abwasser gesenkt, erhöht sich die Rohstoffausbeute, Rejektmenge und damit Entsorgungskosten werden reduziert. Die meisten Hersteller von Spezialpapier betreiben als Direkt-einleiter eine eigene Kläranlage und profitieren damit direkt von den genannten Einspareffekten.

Die Höhe möglicher Einsparungen zeigt ein Beispiel einer Modellpapierfabrik mit kmU-Charakter und folgenden Eckdaten:

Produktionsmenge	30.000 t/a
Spezifische Abwassermenge	30 m ³ /t
Kosten für Zellstoff	450 €/t
Kosten für Füllstoff (TiO ₂)	2000 €/t
Kosten für Abwasserbehandlung ¹⁾	0,21 €/t
Kosten für Schlamm Entsorgung ²⁾	50 €/t

¹⁾ Werte für Spezialpapierhersteller, gewichtet über Abwassermenge, Bereich 0,09–0,37 €/m³ [1]

²⁾ Entsorgung in Ziegelindustrie, Bereich 35–200 €/t [1]

In Abb. 15 sind Kosteneinsparungen anhand ausgewählter Optimierungen dargestellt. Die gewählten Reduzierungen der Stoffverluste entsprechen in ihrer Größenordnung typischen Werten aus den untersuchten vier Werken. Insbesondere wenn teure Füllstoffe verwendet werden, wie bei der Produktion von Dekorpapier, sind die Kosteneinsparungen bereits bei geringen Reduzierungen der Stoffverluste sehr hoch.

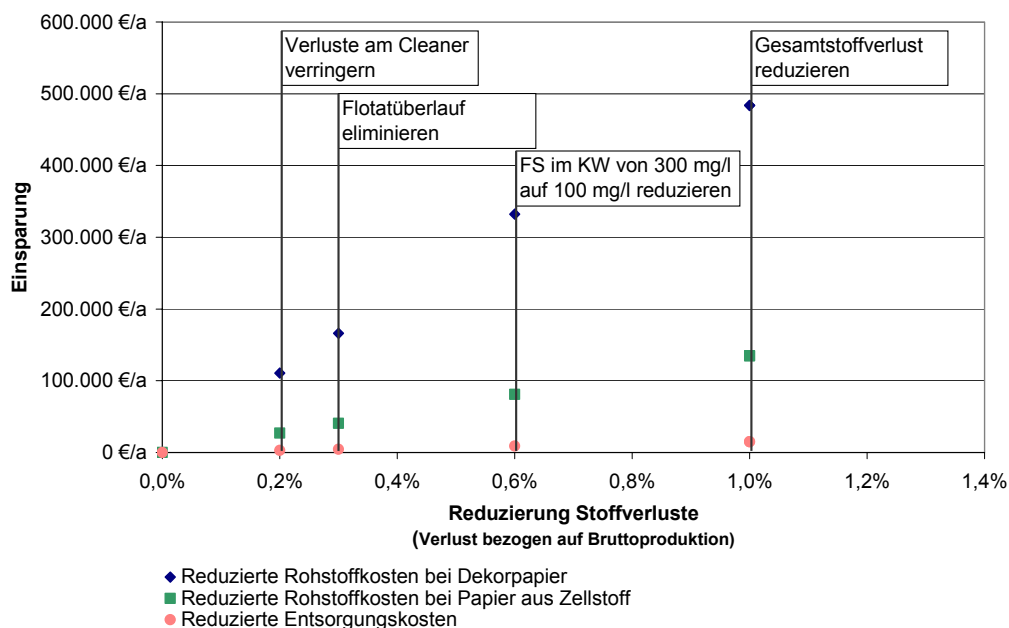


Abb. 15 Kosteneinsparungen ausgewählter Fallbeispiele

Signifikante Einsparungen sind jedoch auch bei Papiersorten möglich, deren Rohstoffkosten überwiegend vom Rohstoffpreis für Zellstoff bestimmt werden. Die Investitionen, die aufgewendet werden müssen, um die Einsparungen zu erzielen, sind für die dargestellten Fallbeispiele im Allgemeinen gering, so dass Payback-Zeiten von unter zwei Jahren realistisch sind. Die Entsorgungskosten für Schlämme aus der Abwasserreinigung führen bei dem gewählten Entsorgungsweg über die Ziegelindustrie nur zu einer geringen Kostenentlastung.

Eine Reduzierung der Abwassermenge um 10 m³/t führt für die gewählte Modellfabrik zu einer jährlichen Einsparung von 63.000 €. Das Potenzial zur Kostenreduzierung im Abwasserbereich ist damit im Vergleich zu den Einsparungen im Rohstoffbereich geringer. Zu beachten ist jedoch, dass viele Maßnahmen zur Reduzierung der Abwassermenge nur geringe Investitionen erfordern.

Ansprechpartner für weitere Informationen:

Dipl.-Ing. Achim Hutter
Tel. 089/12146-227
a.hutter@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
Heßstraße 134
80797 München
Tel. (089) 1 21 46-0
Fax (089) 1 21 46-36
e-Mail: info@ptspaper.de
www.ptspaper.de

Literaturverzeichnis

- 1 DEMEL I, JUNG H.
Wasser- und Rückstandsumfrage in der Deutschen Papierindustrie
VDP-INFOR-Projekt Nr. 83R, München, 2004
- 2 RENTROP G.-H., WINDHAGEN K. (Hg.)
Papier 2005, Ein Leistungsbericht, Stand Mai 2005
Bonn, Verband deutscher Papierfabriken e.V. (Hg.) 2005
- 3 ZIPPEL F.
Wasserhaushalt in Papierfabriken
Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag 1999
- 4 LAUFMANN M., HUMMEL W.
Neutrale holzhaltige Papierherstellung 1990
Wochenblatt für Papierfabrikation 119, 269 - 293 (1991), Nr. 8
- 5 KAPPEN J.
Bestandsaufnahme und Verbesserung von Wasserkreisläufen in Papierfabriken mit integrierter
Altpapierstoffherzeugung
Abschlussbericht AiF 9584 / PTS-Forschungsbericht 03/96
München: PTS 1996
- 6 KAPPEN J. und W. DIETZ
Reduzierung der spezifischen Abwassermenge durch Optimierung der Wasserkreisläufe in
Papierfabriken mit integrierter Holzstoffherzeugung
Abschlussbericht AiF 10860 / PTS-Forschungsbericht 07/99
München: PTS 1999
- 7 KAMML G.
Reduzierung der spezifischen Abwassermenge durch Optimierung der Wasserkreisläufe bei der
Erzeugung holzfreier Papiere
Abschlussbericht AiF 13093 / PTS-Forschungsbericht 01/04
München: PTS 2004
- 8 KAPPEN, J.
Kennwerte als Werkzeuge zur Minimierung des Wasserbedarfs bei der Papierherzeugung – ein
Beitrag zum prozessintegrierten Umweltschutz
Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft Nr. 166; TU München, 2001
- 9 PFAFF, D., DIETZ, W., GÖTZ, B.
Wasser- und Abwassersituation in der deutschen Papierindustrie - Ergebnisse der
Wasserumfrage 2001
Wochenblatt für Papierfabrikation, 132, 6, 2004, 304-307
- 10 VIKIO P.A.
Recovering fiber and filler from mineral loaded paper mill rejects
In: Engineering & Papermakers: Forming Bonds for Better; Papermaking. Book 2. Conference
10.06.-10.09.1997; Nashville. TAPPI; Atlanta (Hrsg.); Atlanta: TAPPI Press 1997. S. 639 - 652
- 11 KLUTER E.
Trenntechnik – eine neue Technologie zur Verringerung von Reststoffen
Wochenblatt für Papierfabrikation 124; 189 - 191 (1996); Nr.5

- 12 TRUTSCHLER J., BEINDORF T.
Prozesswasseraufbereitung/Faserrückgewinnung als Weg zu neuen Produkten
in: Wasserkreisläufe in der Papiererzeugung: Gestaltung - Belastung - Mikrobiologie; Kappen J.,
Pauly D. (Hg.), PTS-Manuskript PTS-MS 817
München: PTS 1998
- 13 YEAGER B.
New information system offers Manistique better access to process and quality data
Pulp and Paper (USA) 72; 59 - 62 (1998); Nr.6
- 14 CHRYSSOS G., MAECK K., GELLER A.N.
Reststoffvermeidung und -verwertung in der Papierindustrie
Abfallwirtschafts Journal 7; 465 - 470 (1995); Nr.7/8
- 15 N.N.
Kleines Lexikon Papier, Karton, Pappe
Bonn: Verband deutscher Papierfabriken e.V. (Hg.) 1992