

## **Abwasserfreie Erzeugung von weiß gedeckten Wellpappenrohpapieren ohne Qualitäts- und Produktivitätsverlust**

W. Dietz, C. Mannert, S. Bierbaum und S. Schramm

Inhalt	Seite
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Wissenschaftliche und technische Problemstellung</b> .....	<b>5</b>
1.1 Einleitung.....	5
1.2 Eigenheiten der Herstellung von weiß gedecktem Wellpappenrohpapier.....	6
1.3 Kreislaufschließung .....	6
<b>2 Forschungsziel</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Datenaufnahme in Papierfabriken</b> .....	<b>7</b>
<b>4 Ermittlung von Wasserbelastungslimits – Versuche am Bahnbildner</b> .....	<b>8</b>
4.1 Ziel und Methodik .....	8
4.2 Einfluss der Wasserqualität auf die braune Lage .....	11
4.3 Einfluss der Wasserqualität auf die weiße Decke.....	17
<b>5 Verfahren zur Wasserentfärbung</b> .....	<b>18</b>
<b>6 Folgerungen für Belastungslimits und Wassereinsatz</b> .....	<b>21</b>
<b>7 Möglichkeiten der Frischwasser-Einsparung</b> .....	<b>21</b>
<b>8 Salz-Bilanzierung und Reduzierung des Salzeintrags</b> .....	<b>23</b>
<b>9 Simulation der Wasserkreislaufeinengung und -schließung</b> .....	<b>24</b>
9.1 Ziel und Methodik .....	24
9.2 Szenarien .....	26
9.3 Bewertung der Maßnahmen zur Kreislaufeinengung .....	30
<b>10 Regeln und Konzepte der Wasserkreislaufeinengung und -schließung</b> .....	<b>32</b>
<b>Ansprechpartner für weitere Informationen</b> .....	<b>34</b>
<b>Glossar</b> .....	<b>35</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>36</b>

## Zusammenfassung

**Zielstellung** Zur Kreislaufeinengung und Kreislaufschließung bei der Herstellung von braunen Wellpappenrohpa-pieren liegen aus Forschung und Praxis umfangreiche Erkenntnisse vor. Bei der Herstellung von höherwertigem weiß gedecktem Liner aus Altpapier birgt die Thematik jedoch Aspekte, die die Forschung bislang nicht adressierte. Ziel dieses Forschungsvorhaben war daher, für diesen Sortenbereich Wege zur Kreislaufschließung unter Beibehaltung der Maschinenproduktivität und der Qualität der produzierten Sorten aufzuzeigen.

---

**Papierfestigkeit – Belastungslimits** Zur Klärung des Einflusses der Wasserqualität im weißen und braunen Strang wurden Versuche am Bahnbildner durchgeführt. Die Belastung des verwendeten Wassers wurde durch Zumischung von hoch belastetem Kreislaufwasser und von Salzen erhöht. Mit steigendem CSB-Wert reduzierten sich der Berst- und auch der Stauchwiderstand. Zur Einhaltung von Festigkeitswerten sollte der CSB-Wert im Wet-End der braunen Lage daher nicht ansteigen. Eine Erhöhung der Salzgehalte erscheint dagegen in Grenzen tolerabel. Um Korrosionsschäden zu vermeiden, sollte ein Chloridwert von 500 mg/l nicht überschritten werden.

---

**Produktweiße – Wasserqualität für die weiße Decke** Ein Einsatz von Kreislaufwasser aus den braunen Lagen ist bei mittlerer bis hoher Anforderung an die Weiße der Deckenlage nicht akzeptabel. Biologisch gereinigtes Wasser (Biowasser) zumindest anteilig in der weißen Decke einzusetzen, ist nach den Versuchen dagegen möglich. Entfärbungsversuche zeigten: Eine vorgeschaltete Feinfiltration zur Entfernung von Partikeln hat den höchsten Nutzen für die Produktweiße im Verhältnis zum Aufwand.

---

**Maßnahmen zur Kreislaufeinengung** Simulationsrechnungen wurden durchgeführt, um verschiedene Gestaltungsoptionen zu bewerten. Durch eine Kreislauftrennung mit Gegenstromführung im braunen Strang kann der Wasserkreislauf unter Einhaltung der Belastungslimits bis auf 3–4 m<sup>3</sup>/t eingeeengt werden. Als nicht zielführend stellten sich eine Kreislauftrennung im weißen Strang und eine Kaskadierung heraus.

Schlüssel zur weiteren Kreislaufeinengung bis hin zur Kreislaufschließung ist die Rückführung von Biowasser. Sie ermöglicht eine Kompensation des CSB-Anstiegs an der Papiermaschine. Biowasser kann zudem nach Vorbehandlung zur Stoffverdünnung in der weißen Linie und für Aggregate eingesetzt werden, für deren Betrieb üblicherweise Frischwasser gefordert wird.

Zur Minderung von Salzgehalten ist die Reduzierung der Einträge durch Additive erster Ansatzpunkt. Die einzelnen Quellen sind analytisch zu differenzieren. Hierfür wurde ein Vorschlag erarbeitet.

---

**Wirtschaftlichkeit** Im untersuchten Fall erwies sich die Wasserkreislaufschließung in den Betriebskosten teurer als ein stark eingeeengter Wasserkreislauf. Diese Aussage ist für einen Großteil der Papierfabriken im Sortenbereich weiß gedeckte Wellpappenrohpa-piere und darüber hinaus verallgemeinerbar. Dennoch ist eine Einzelfallbetrachtung stets notwendig. Die Forschungsarbeiten stellen hierfür eine Methodik zur Verfügung.

---

---

**Danksagung** Das Forschungsvorhaben AiF 13982 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 gedankt.

Unser besonderer Dank gilt zudem den Projektbegleitern und Vertretern der beteiligten Papierfabriken für die freundliche und intensive Unterstützung.

---

## Abstract

**Title** Effluent-free production of corrugated board base paper without quality or productivity losses

---

**Objective** There is an extensive body of knowledge drawn from research and practice on the narrowing and closure of water circuits in the production of brown corrugated board base paper. When high-quality white linerboard is produced from recovered paper, however, aspects arise that have not yet been addressed in research. The objective of this research project was therefore to develop for this product group means of closing water circuits while continuing to retain good machine productivity and the quality of the grades produced.

---

**Paper strength – Maximum load** Pilot paper machine trials were conducted to ascertain the impact of water quality in the white and brown lines. The loading of the water used was increased by adding highly polluted process water and salts. Bursting and compression strength was found to decrease with rising COD value. Hence, the strength values of the brown layer can be maintained by not allowing the wet-end COD value to rise. A rise in the salt content, on the other hand, appeared to be tolerable within certain limits. However, to avoid corrosion damage, the chloride value should not exceed 500 mg/L.

---

**Product whiteness – Water quality for the white liner** The use of circuit water from the brown layers is unacceptable if moderate to stringent requirements are imposed on the brightness of the liner. The use of biologically treated water in the white liner, at least in certain proportions, is feasible based on the trial results. Decolourisation trials showed that upstream fine filtration for particle removal had the greatest benefit for product brightness compared to the outlay involved.

---

---

**System closure measures**

Simulated calculations were conducted in order to evaluate different design options. The water circuit can be narrowed while limiting the load to 3-4 m<sup>3</sup>/t by separating the water loops and providing countercurrent flow in the brown line. Water loop separation in the white line combined with a cascade, on the other hand, was not successful.

The key to further narrowing of the water circulation culminating in water loop closure is the recirculation of biologically treated water. Recirculation makes it possible to compensate for the COD rise in the paper machine. In addition, once pre-treated, biologically treated water may also be used to dilute the stock in the white line and for systems whose operation normally requires fresh water.

Input reduction by means of additives is the principal approach to decreasing the salt concentrations. The individual sources must be analysed and differentiated. A methodology has been worked out for this purpose.

---

**Economic feasibility**

In the case study, water circuit closure proved to generate higher operating costs than if water circuits were greatly narrowed. This generalisation applies to a large number of paper mills in the product group of white top liner and in other product groups. Nonetheless, it is always necessary to look at each individual case. The research study therefore made a methodology available for this purpose.

---

**Acknowledgement**

The AiF 13982 research project was funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) and carried out under the umbrella of the German Federation of Industrial Cooperative Research Associations (AiF) in Cologne. We would like to express our gratitude for this support.

We should also like to express our appreciation to the participating companies and persons for their assistance and contributions.

---

# 1 Wissenschaftliche und technische Problemstellung

## 1.1 Einleitung

**Wasserverbrauch** In den letzten Jahrzehnten hat die Papierindustrie beachtliche Anstrengungen geleistet, um den spezifischen Frischwasserverbrauch und Abwasseranfall zu reduzieren. Motivation waren rechtliche Vorgaben, aber auch wirtschaftliche Vorteile wie die Minderung von Rohstoffverlusten über den Abwasserweg und geringere Kosten für Frischwasser, Abwasserbehandlung und Abwasserabgabe.

---

**Entwicklungen bei Verpackungspapier-Herstellern** Die Hersteller von Papieren aus Altpapier ohne Deinking weisen heute mit im Mittel 4,1 m<sup>3</sup>/(t Bruttoproduktion) die geringste spezifische Abwassermenge unter den verschiedenen Sortenbereichen auf [1]. In der Entwicklung gab es in Deutschland verschiedene Meilensteine:

- In den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wagten einige Verpackungspapierhersteller den Schritt zur abwasserfreien Papierproduktion. Die Erfahrungen waren jedoch größtenteils negativ, so dass die Wasserkreisläufe bis heute teilweise wieder geöffnet wurden. Werke mit geschlossenem Wasserkreislauf sind heute mit Jahresproduktion 6.000–30.000 t zumeist sehr klein [1].
- 1995/96 integrierte ein Werk eine anaerob-aerobe Kreislaufwasserreinigung unter Beibehaltung des geschlossenen Wasserkreislaufs [2].
- 2001 schloss ein Werk den Wasserkreislauf unter Integration einer anaeroben Kreislaufwasserreinigung [3].
- In den letzten Jahren wurden von zwei Werken Membranfiltrationsverfahren im geschlossenen Wasserkreislauf zur Kreislaufwasserreinigung mit oder ohne vorgeschaltete biologische Stufen (Biologie) installiert. Beide konnten die technischen Schwierigkeiten, die die Membranverfahren mitbrachten, nicht überwinden (u. a. [4]).

Heute führen in Deutschland ca. 15 Werke gereinigtes Wasser aus biologischen Reinigungsanlagen (Biowasser) in den Produktionswasserkreislauf zurück. Vorrangige Produkte dieser Werke sind braune Verpackungspapiere. Entsprechend beziehen sich verfügbare Praxiserfahrungen und Veröffentlichungen zur Wasserkreislaufeinengung und -schließung vorrangig auf diesen Sortenbereich.

---

**Weißer Liner** Als eine Möglichkeit, sich durch spezielle Sorten am Markt zu etablieren, sehen Wellpappenrohpapier-Hersteller die Produktion von weiß gedecktem Liner. Ist der weitgehend oder ganz geschlossene Wasserkreislauf ein technisch und wirtschaftlich machbarer Weg auch bei der Herstellung von weiß gedecktem Liner? Diese Frage steht im Mittelpunkt der vorliegenden Forschungsarbeit.

---

## 1.2 Eigenheiten der Herstellung von weiß gedecktem Wellpappenrohpapier

<b>Liner</b>	Entsprechend ihrer Verwendung bei der Wellpappenherstellung wird bei den Wellpappenrohpapieren zwischen Deckenpapieren (Liner, Testliner) und Wellenpapieren (Fluting, Medium) unterschieden. Bedingt durch das Herstellungsverfahren von Wellpappe und die spätere Verwendung bei der Packmittelherstellung werden die Deckenpapiere Zug, Stoß, Druck und Biegung ausgesetzt. Für Testliner spezifiziert sind in aller Regel Berstfestigkeit und Stauchwiderstand.
<b>Weißer Liner</b>	Bei weiß gedecktem Wellpappenrohpapier (weißem Liner) handelt es sich meist um ein zwei- oder mehrlagiges Papier aus Altpapierstoff, bei dem für die obere Lage hochwertige weiße Altpapiersorten verwendet werden. Zur Herstellung von mehrlagigem Papier werden mehrere Stoffaufläufe und Siebpartien benötigt. Die feuchten Lagenbahnen werden in nassem Zustand vergautscht.
<b>Weißer Linie</b>	Um Beeinträchtigungen der optischen Qualität auszuschließen, sind die Stoffaufbereitung, der Konstantteil und die Siebpartie für die weiße Decke, also die weiße Linie, von anderen (braunen) Stofflinien stoff- und wasserseitig abgetrennt. Der Verdünnungswasserbedarf der weißen Linie wird im Normalfall durch Frischwasser gedeckt.

## 1.3 Kreislaufschließung

<b>Kreislaufwasserbelastung</b>	Bei Reduzierung der spezifischen Abwassermenge steigen die Konzentrationen von Störstoffen im Kreislaufwasser, ausgedrückt z. B. durch CSB-Wert und Salzgehalte. Im geschlossenen Wasserkreislauf ist dann je nach Rohstoffeinsatz mit CSB-Werten von 15.000–30.000 mg/l zu rechnen.
<b>Auswirkungen auf Produktion und Produkt</b>	Der Konzentrationsanstieg von Störstoffen im Papiermaschinenkreislauf beeinflusst sowohl den Produktionsprozess als auch die Papierqualität. Die Wirksamkeit chemischer Additive wird als abhängig vom Störstoffgehalt und von der Leitfähigkeit im Stoff-Wasser-System angesehen [5]. Zudem können bei erhöhter Wasserbelastung Ablagerungen an oder in Anlagenteilen auftreten. Folgen sind erhöhte Stillstandszeiten und vermehrter Wartungsaufwand. Eine schlechtere Wasserqualität kann auch die optischen Eigenschaften der Papiere negativ beeinflussen. Dies ist bei der Herstellung von weiß gedecktem Liner bedeutsam: Abweichungen von der geforderten Weiße entscheiden über die Konkurrenzfähigkeit des Produktes.
<b>Einsparen von Frischwasser</b>	Für eine Reihe wasserverbrauchender Aggregate und Anwendungszwecke wird für einen störungsfreien Betrieb Frischwasser gefordert. Im geschlossenen Wasserkreislauf stehen jedoch nur noch spezifisch 1–1,3 m <sup>3</sup> /t Frischwasser zur Verfügung. Zahlreiche Anstrengungen wurden von Seiten der Forschung und der Anlagenbauer unternommen, um den Frischwasserbedarf verschiedener Verbraucher zu reduzieren [6, 7, 8, 9, 10]. Ein Frischwasser-Ersatz in der weißen Linie ist bislang nicht untersucht worden.

---

<b>Kreislaufoptimierung</b>	Ergebnisse früherer Forschungsvorhaben zeigen deutlich, dass durch die Optimierung der Wasserkreisläufe der Frischwassereinsatz reduziert werden kann, ohne die Wasserbelastungen an der Papiermaschine ansteigen zu lassen [6, 7, 8]. Gestaltungsprinzipien einer Wasserkreislauf-Optimierung sind u. a. die Kreislauftrennung mit Gegenstromführung und die Kaskadierung.
<b>Integration von Reinigungsverfahren</b>	Um die Belastung des Kreislaufwassers mit Störstoffen zu reduzieren, können Reinigungsstufen in den Kreislauf integriert werden. Grundsätzlich in Frage kommen biologische Verfahren, Membranfiltrationsverfahren, Ozonisierung, Elektrodialyse und Vakuumverdampfung.
<b>CSB- und Salzeinträge</b>	Durch die Integration von Reinigungsstufen wird eine Belastungssenkung in den Wasserkreislauf eingebracht. Ebenso ist zu prüfen, ob auf der anderen Seite der Eintrag von Belastungsgrößen reduziert werden kann. CSB-Quelle ist in erster Linie das eingesetzte Altpapier, so dass der Eintrag aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus wenig beeinflusst werden kann. Stärkere Einflussmöglichkeiten sind für Salzeinträge zu erwarten. In der Literatur ist die Thematik nur vereinzelt ausgeführt [11, 12].

---

## 2 Forschungsziel

<b>Forschungsziel</b>	Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Wege zur Kreislaufschließung bei der Herstellung von weiß gedecktem Liner ohne Deinking unter Beibehaltung der Maschinenproduktivität und der Qualität der produzierten Sorten aufzuzeigen.
-----------------------	---

---

## 3 Datenaufnahme in Papierfabriken

<b>Ziel und Prinzip</b>	Zwei Papierfabriken des Sortenbereichs Wellpappenrohapiere mit weißer Decke wurden als Modellfälle ausgewählt. Eine umfassende Datenaufnahme diente als Basis für die Versuche und Simulationsberechnungen.
<b>Charakterisierung</b>	<p>Die ausgewählten Werke wiesen spezifische Abwassermengen im Bereich 5–7 m<sup>3</sup>/t auf. In den weißen Linien wurden weiße Altpapier-Sorten und nur Frischwasser eingesetzt. Keines der Werke verfügte über eine Kreislauftrennung mit Gegenstromführung. Auch die Wasserkreisläufe von den jeweils zwei Papiermaschinen – nur jeweils eine produzierte weißen Liner – waren nicht voneinander getrennt. Es waren daher jeweils die Gesamtkreisläufe zu betrachten.</p> <p>Aufgrund in beiden Werken vergleichbarer Ergebnisse wird im Folgenden nur Werk A detailliert dargestellt.</p>

---

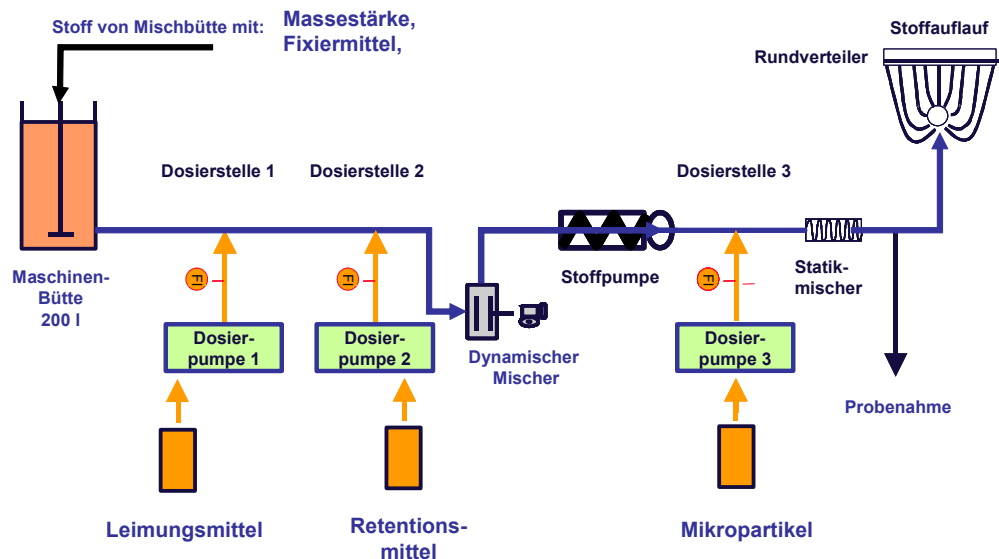
## 4 Ermittlung von Wasserbelastungslimits – Versuche am Bahnbildner

### 4.1 Ziel und Methodik

**Ziel** Ziel der Versuche war die Bestimmung der maximalen Wasserbelastungen (Belastungslimits), bei denen noch keine Verschlechterung der Retention, der Festigkeit und der Produktweiße des Papiers auftritt. Betrachtet wurden CSB-Werte, Chlorid- und Sulfatgehalte sowie die Färbung.

**Prinzip** Die Versuche wurden am kontinuierlichen Bahnbildner durchgeführt. Faserstoffe und Rezeptur entsprachen Werk A. Eine Erhöhung der Wasserbelastungen wurde erreicht, indem zum einen Salze zugesetzt wurden, zum anderen indem hoch belastetes Prozesswasser aus einem Werk mit einem geschlossenen Wasserkreislauf zugemischt wurde.

**Versuchsaufbau** Der kontinuierliche Bahnbildner war wie folgt aufgebaut:





**Probenmaterial**

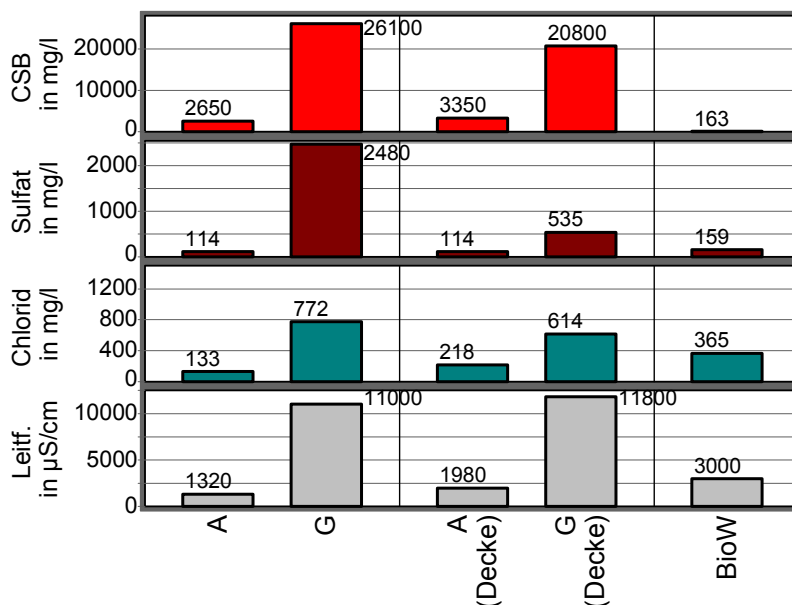
Als Faserstoffe und Wässer wurden verwendet:

Bezeichnung	Erläuterung
Einlagestoff	Fertigstoff Einlagestrang aus Werk A
Weißer Späne	AP-Sorte weiße Späne (trocken) aus Werk A
Werk A, SW	Siebwasser aus Werk A
A	Klarwasser aus Werk A
G	Klarwasser aus einer Altpapier verarbeitenden Papierfabrik mit geschlossenem Wasserkreislauf ohne integrierte biologische Reinigung
BioW	Biologisch gereinigtes Wasser aus dem Ablauf der Biologie eines Altpapierverarbeiters

Die Prozesswässer A, G und BioW wurden vor dem Einsatz durch Sedimentation von Feststoffen befreit.

**Wasseranalytik der Prozesswässer**

Die Prozesswässer, die zur Einstellung der Wasserbelastungen verwendet wurden, wiesen folgende Eigenschaften auf:



**Rezeptur**

Das Additivsystem enthielt kationische Massestärke, Fixiermittel (kationisches Polyacrylamid) und Retentionsmittel (kationisches Polyacrylamid) mit Mikropartikelkomponente (anionisches Kieselsäuresol). Die Additivdosierung blieb bei den Hauptversuchen gleich. Bei den Versuchen zur weißen Deckenlage wurde zusätzlich ein AKD-Leimungsmittel eingesetzt. In Zusatzversuchen wurden Retentionsmittel- und Leimmengen variiert.

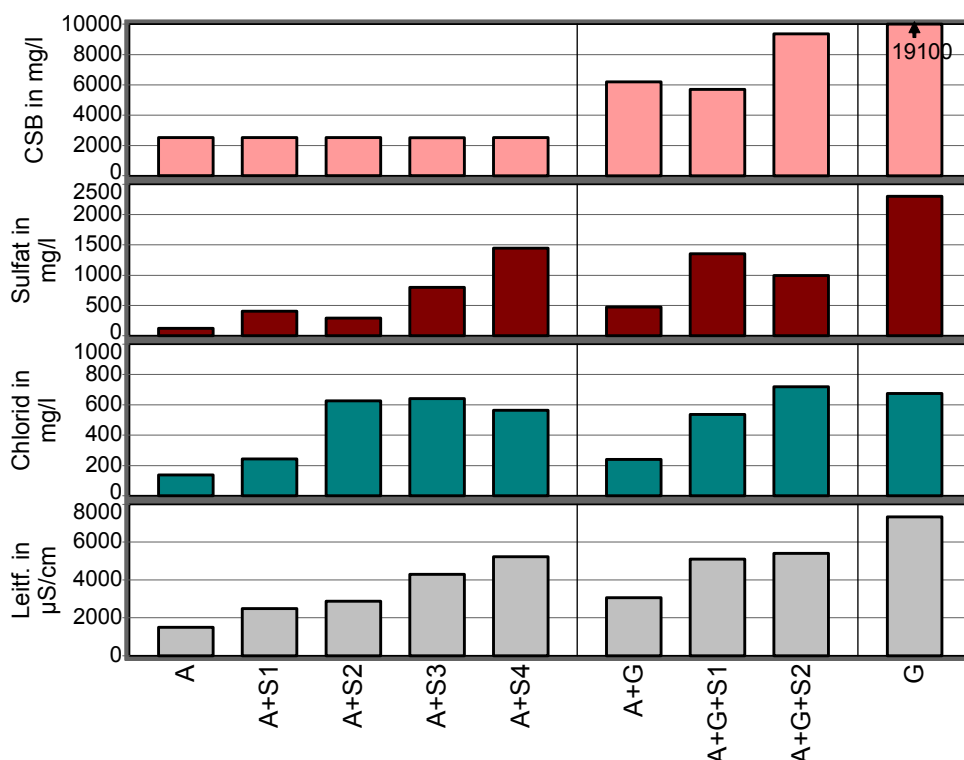
Um auch eine konstante Menge Feinstoffe zu gewährleisten, wurde Siebwasser sedimentiert und das Sediment in jeweils gleicher Menge dem Stoff zugegeben.

**Versuchsreihe  
braune Lage**

Durch Verdünnung des Klarwassers aus einem offenen Kreislauf (A) mit Klarwasser aus einem geschlossenen Kreislauf (G) wurden unterschiedlich belastete Wässer hergestellt. Die Salzgehalte wurden durch Salzzugabe (S) erhöht. Folgende Wassermischungen wurden eingesetzt:

- Aufstocken von Wasser A mit Natriumchlorid und/oder Natriumsulfat (A+S...)
- Mischung von Wasser A mit G (A+G) , Salzzusatz (A+G+S...)
- Wasser G

Die eingestellten CSB-Werte und Salzgehalte charakterisieren die verschiedenen Grade der Kreislaufschließung:



Zielwert der Flächenbezogenen Masse der gebildeten Papierbahn war 90 g/m<sup>2</sup>. Der Berstdruck sowie der Stauchwiderstand (SCT in Querrichtung) wurden als Zielparameter ausgewertet. Der Berstdruck wurde als Berstdruckindex auf das Flächengewicht bezogen.

**Versuchsreihe  
weiße Decke**

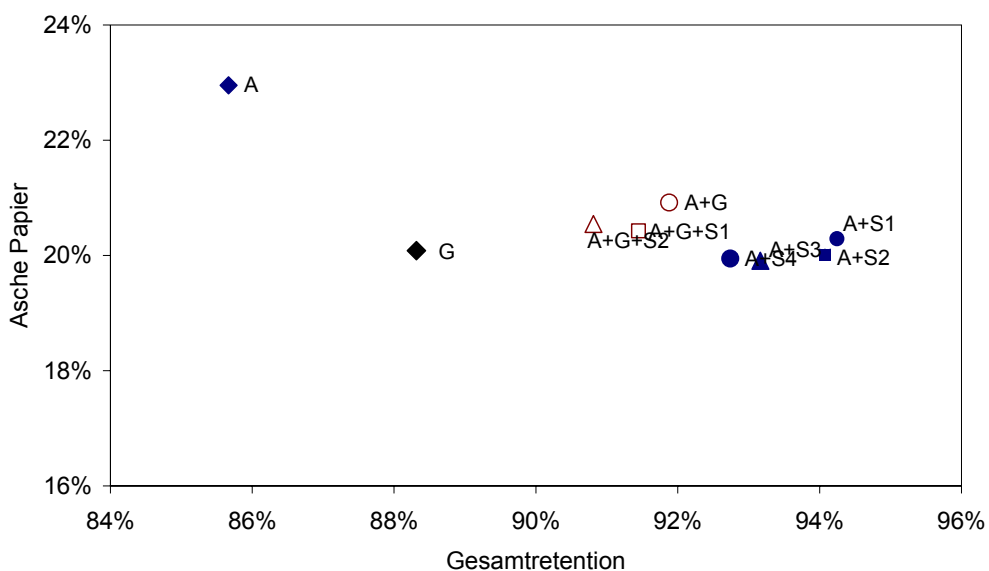
Für die Versuche wurde die Altpapiersorte Weiße Späne und Frischwasser verwendet. Stufenweise wird jeweils ein Teil des Frischwassers durch Klarwasser A oder durch Biowasser BioW ersetzt. Zielwert der Flächenbezogenen Masse war 60 g/m<sup>2</sup>. Betrachtete Zielparameter waren die Produktweiße und Opazität. Zudem wurde der Einfluss auf eine AKD-Leimung untersucht.

**4.2 Einfluss der Wasserqualität auf die braune Lage****4.2.1 Zusammenhang der Wasser- und Prozessparameter****CSB-PCD und  
CSB-Härte**

Der CSB-Wert korrelierte in der Tendenz mit dem kationischen Bedarf (PCD-Wert). Auch korrelierten in den Versuchsansätzen Härte und CSB-Wert. Die Auswertediagramme verwenden Leitfähigkeit und CSB-Wert als Maßstab.

**Retention-Asche**

Die Gesamtretention lag bei 86–95 %:

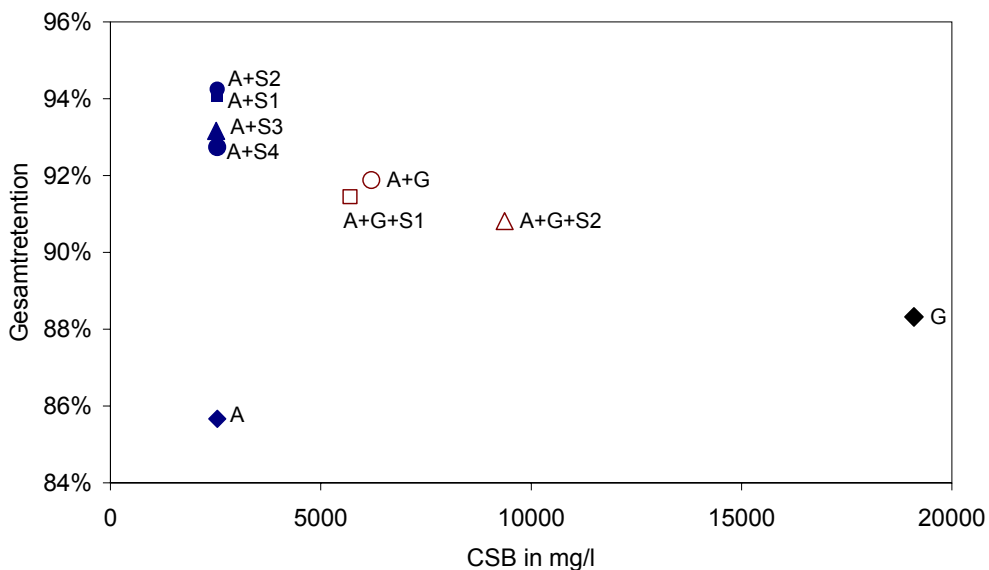


Die Ascheretention lag im Bereich 78–88 % und korreliert stark mit der Gesamtretention (ohne Abb.). Hieraus erklärt sich der einheitliche Aschegehalt im Papier von ca. 20 %. Versuch A fällt aus diesem Zusammenhang heraus. Er ist in den folgenden Darstellungen mit aufgenommen, aber als Ausreißer zu werten. Bei diesem ersten Versuch der Versuchsreihe war die Einstellung der Anlage noch nicht stabil.

### 4.2.2 Einflüsse auf die Retention

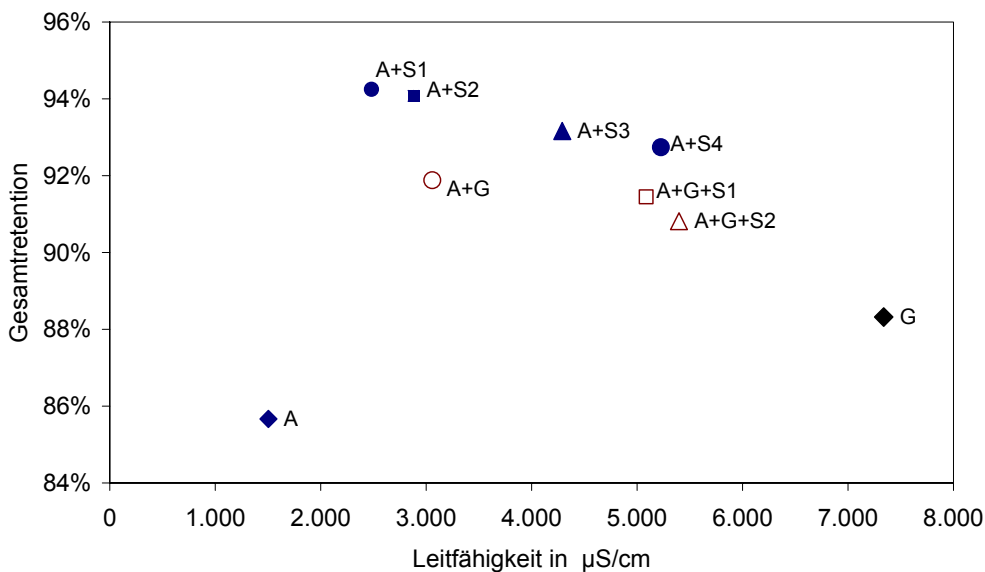
#### CSB-Retention

Die Gesamtretentionen der Versuche lagen im Bereich von 85 % bis 95 %. Es zeigt sich eine mit dem CSB-Wert fallende Retention:



#### Leitfähigkeit-Retention

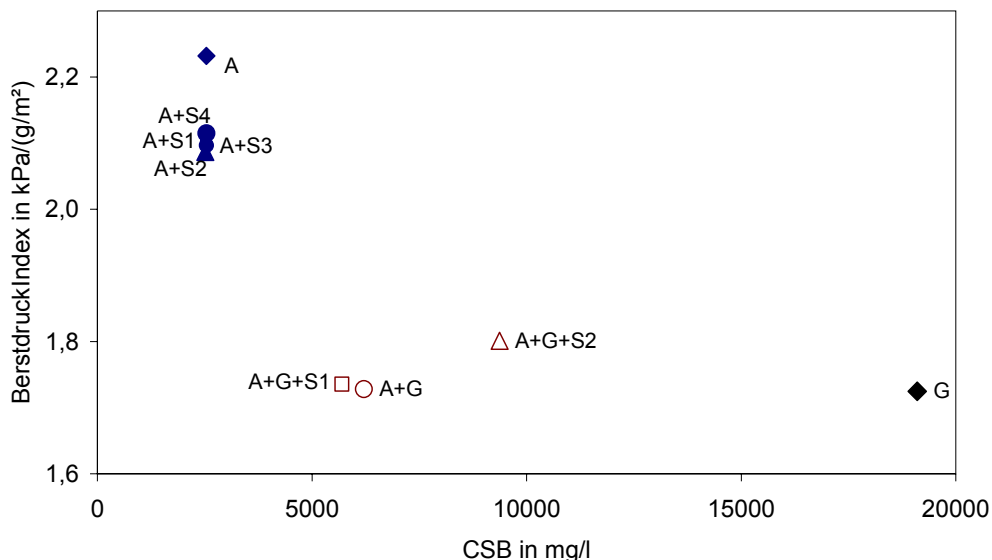
Auch mit steigender Leitfähigkeit fiel die Retention ab:



Eine vollständige Differenzierung der Einflüsse durch CSB und Salze ist damit nicht möglich. Jedoch deuten die Werte der Reihe A+S1 bis A+S4 darauf hin, dass die Leitfähigkeit zumindest einen anteiligen Einfluss auf die Retention hat.

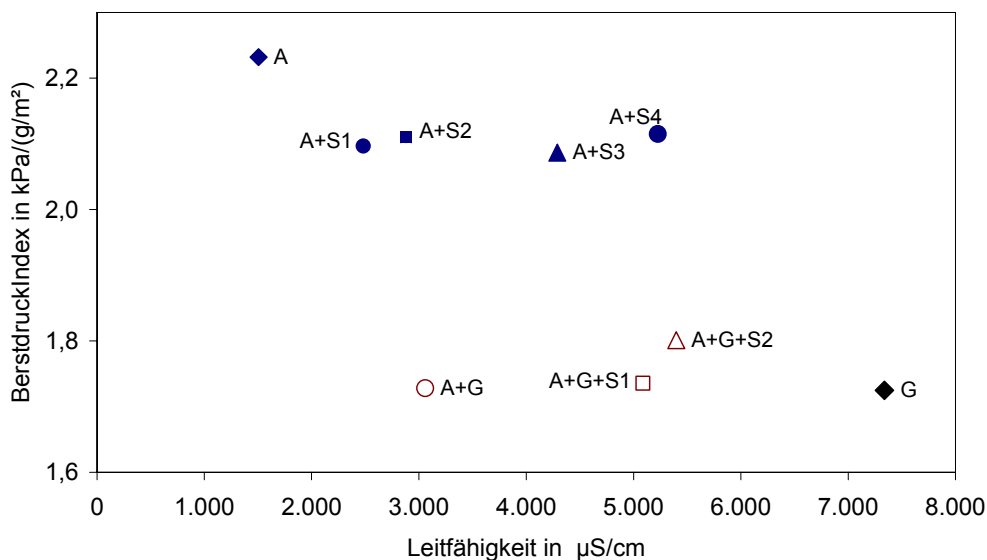
### 4.2.3 Einflüsse auf die Festigkeit

**CSB–Berstfestigkeit** Über den gesamten Bereich der Versuchsansätze fällt der Berstdruckindex um gut 20 % ab. Dies ist bereits bei teilweiser Zumischung von hoch belastetem Klarwasser aus einem geschlossenen Kreislauf zu erkennen (A+G). Der noch höhere CSB-Wert des Klarwassers aus einem geschlossenen Kreislauf (G) von knapp 20.000 mg/l ergibt keine weitere Reduzierung des Berstdruckindex mehr:



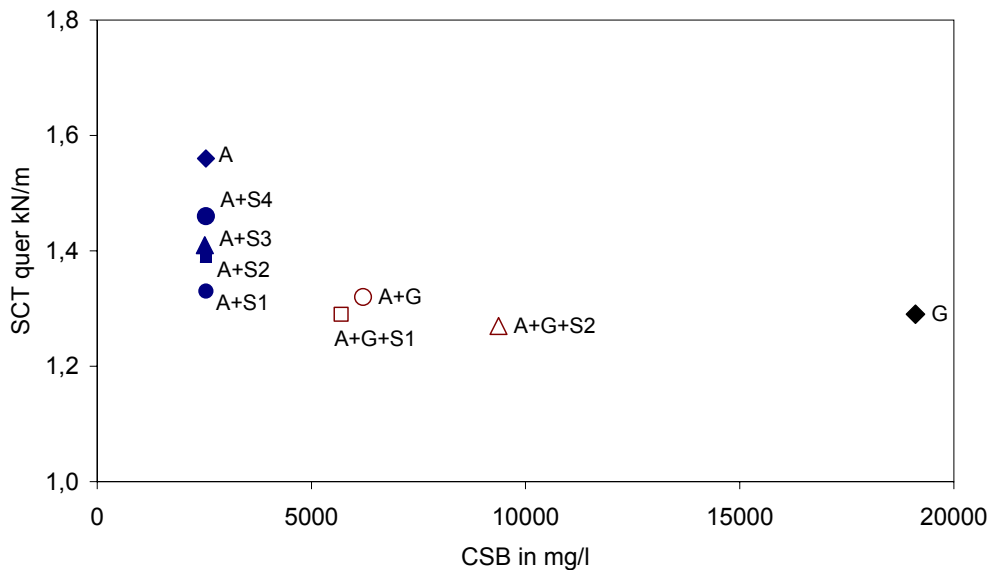
**Leitfähigkeit–Berstfestigkeit**

Die Erhöhung der Salzgehalte führt dagegen zu keiner signifikanten Minderung der Berstfestigkeit innerhalb der Gruppe mit gleichem CSB-Wert (A+S1 bis A+S4); auch eine Differenzierung zwischen Chlorid- und Sulfatzusatz ist damit infällig.



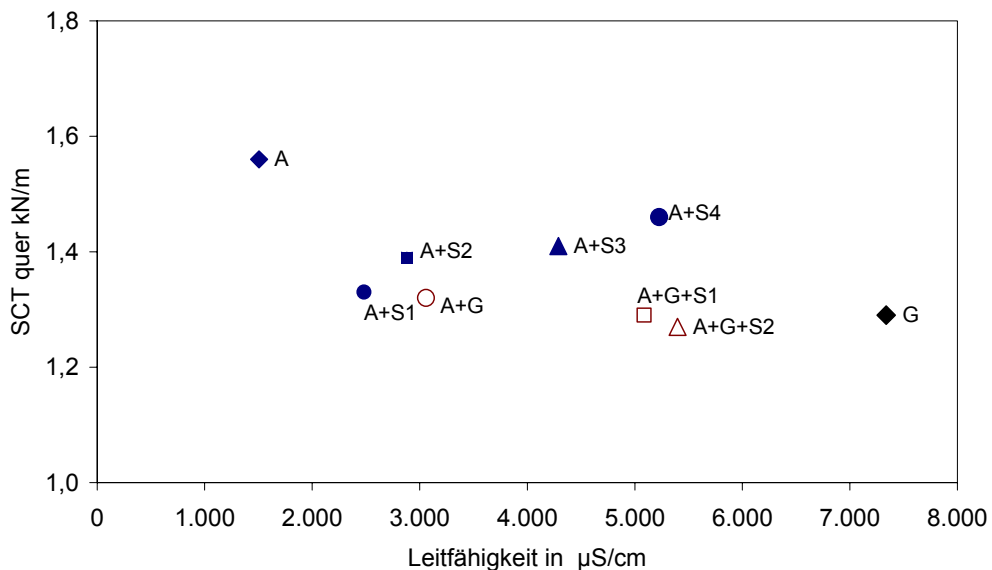
**CSB-SCT**

In ähnlicher Weise wie der Berstdruckindex fällt der Stauchwiderstand (SCT quer) mit steigendem CSB ab, angesichts der Streuungen jedoch mit geringerer Signifikanz.



**Salzgehalte-SCT**

Für den SCT-Wert ergibt sich bei Betrachtung der Leitfähigkeit wiederum kein signifikanter Einfluss:



#### 4.2.4 Diskussion

**Zusammenfassung und Wertung** Nach den Versuchsergebnissen fällt der Berstdruck mit Ansteigen des CSB-Werts ab. Im untersuchten Bereich blieben Zusätze von Chlorid- und Sulfat dagegen ohne erkennbare Wirkung. Für den Stauchwiderstand gelten die gleichen Aussagen bei geringerer Signifikanz und Stärke des Einflusses.

Was Kausalität und mögliche Wirkmechanismen angeht, sind die Ergebnisse mit Bedacht zu interpretieren. Über den CSB-Wert hinaus unterscheiden sich das eingesetzte gering belastete und das hoch belastete Prozesswasser auch in anderen Größen. Dass im Folgenden auf den CSB-Wert fokussiert wird, ist im Hinblick auf eine Kausalität daher als Hypothese zu werten.

#### Vergleich mit Literaturangaben

Mehrere Arbeitsgruppen beschäftigten sich mit den Effekten einer Kreislaufeinengung auf die Festigkeitseigenschaften von Wellpappenrohropapieren. Nachstehende Tabelle gibt einen Überblick und stellt die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit daneben. Für verschiedene Prozess- und Produktparameter wurden die gefundenen Unterschiede aus den Diagrammen der Veröffentlichungen abgelesen und als Veränderung in Prozent angegeben (Versuchspunkt "hoch belastet" zu "gering belastet").

Autor	Joore et al. 1999	Wiseman, Johannesen 2000	Lee et al. 2006	vorliegend
AP-Stoff	-	80% Kartonagen, 20% Zeitungsd. r.	Kartonagen	50% 1.02, 50% 1.04
Wasserherkunft	Werk	Werk, geschl. KL	Werk	mehrere Werke
Stärke	ja	amphoter	-	kat.
Aufkonzentrierung	Umkehrosiose	-	Umkehrosiose	-
Mischung	Konzentrat mit PW	PW mit FW	Konzentrat mit FW	versch. PW + Salze
CSB Bereich	-	0-40.000	0-16.000	2.500-20.000
Blattbildung	FRET (CTP)	Blattbildner	Blattbildner	Bahnbildner
Kreislaufführung	ja	nein	ja	nein
Gesamtretention	-	-	-	-6% abs
Asche im Papier	-1,5% abs.	-	-	± 0%
Berstdruck	-	-25%	-10%	-20%
Stauchwiderstand	-	-12%	-	-7%
Zugfestigkeit	-	-25%	-20%	-
Steifigkeit	-10%	-10%	-	-
CMT	+0%	-8%	-	-

- : keine Angabe; FW: Frischwasser; PW: Prozesswasser

In der Zusammensicht der Ergebnisse sind Berstdruck und Zugfestigkeit stark von einer Kreislaufeinengung betroffen, in geringerem Maße der Stauchwiderstand (SCT).

Joore et al. [13] stellten als kritische Prozessgrößen bei Kreislaufeinengung die Ascheretention und die Entwässerung heraus. Die betrachteten Festigkeitseigenschaften Steifigkeit und CMT fielen nur geringfügig ab. Leider sind die durch Umkehrosiose hergestellten Wässer nicht weiter charakterisiert; auch sind Effekte auf Berstdruck und Stauchwiderstand nicht angegeben.

---

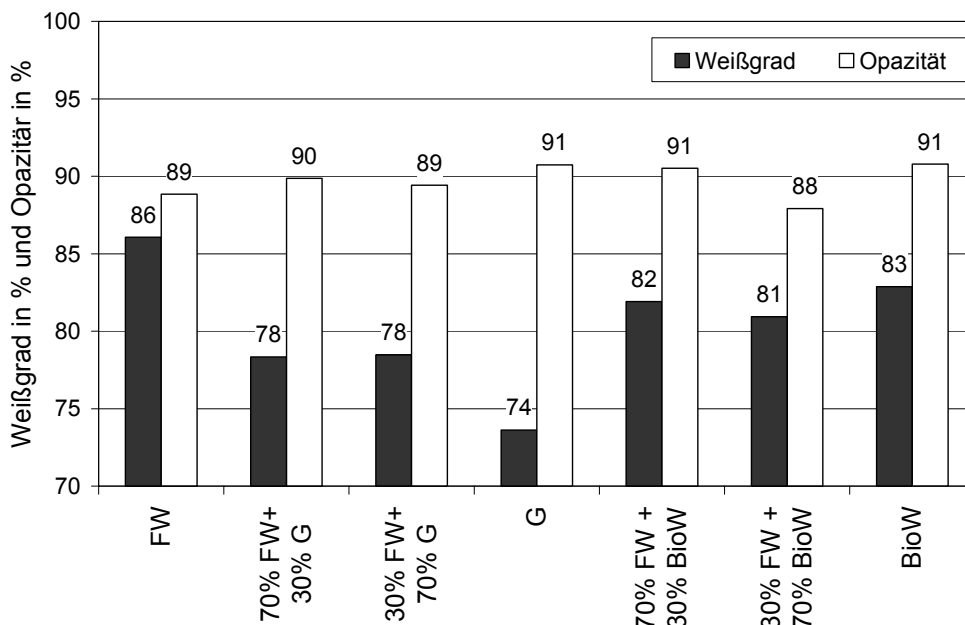
<b>Differenzierung der Einflussgrößen</b>	Weder Joore et al., Wiseman und Johannesen [14] noch Lee et al. [15] differenzierten den Einfluss verschiedener Wasserinhaltsstoffe. In der vorliegenden Untersuchung wurde der Einfluss von Salzen/Leitfähigkeit gegenüber anderen durch Wasserkreislaufeinengung betroffenen Größen differenziert. Lee et al. [15] merkten am Rande in Übereinstimmung mit vorliegenden Ergebnissen an, dass Ionen keinen Einfluss auf die Festigkeiten ausüben.
<b>Aschegehalt</b>	In den Versuchen von Joore et al. fiel der Aschegehalt im Papier um 1,5 % ab, trotz einer Kreislaufführung im verwendeten Blattbildner. In vorliegender Arbeit ergab sich kein Einfluss. Dass die Ascheretention bei unterschiedlichen Altpapierrezepturen und Retentionssystemen unterschiedlich stark von der Wasserbelastung beeinflusst wird, ist plausibel. Die Folgerung ist jedoch, dass Untersuchungen für jeden Einzelfall einer beabsichtigten Kreislaufeinengung notwendig sind, da der Aschegehalt des Papiers eine deutliche Rolle für die Festigkeit spielt [16].
<b>Salzgehalte und Stärkewirkung -</b>	Bereits frühe Arbeiten zeigten eine Abhängigkeit der Adsorption von kationischer Stärke von der Leitfähigkeit. In der von Brouwer [17] untersuchten Stoffmatrix mit Birkensulfatzellstoff sank ab 2000-3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ die Adsorption merklich ab. Nach Wolf [18] behindern in Altpapier haltigen Systemen erst Leitfähigkeitswerte über 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ die Adsorption. Die Untersuchungsreihe A bis A+S4 deckt den Bereich 1.500 bis 5.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ab. Dass ein Einfluss auf Berstdruck und SCT nicht gefunden wurde, steht mit den Aussagen von Wolf tendenziell im Einklang.  Zur Differenzierung zwischen Leitfähigkeit und einzelnen Ionenkonzentrationen liegen aus der Literatur keine belastbaren Aussagen vor.
<b>Fazit</b>	Wenngleich nicht alle Ergebnisse und Literaturbefunde kongruent und die Wirkmechanismen unklar sind, wird insgesamt eine negative Auswirkung einer Kreislaufeinengung auf die Festigkeit von Wellpappenroh papier deutlich. Die vorliegenden Ergebnisse weisen dabei auf organische Störstoffe oder korrelierend ansteigende Wasserinhaltsstoffe als Ursache hin. Die aktuellen Versuche zeigen: Eine Erhöhung der Salzgehalte dagegen erscheint bis zu einer Größenordnung der Leitfähigkeit von 3.000–6.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tolerabel.

---



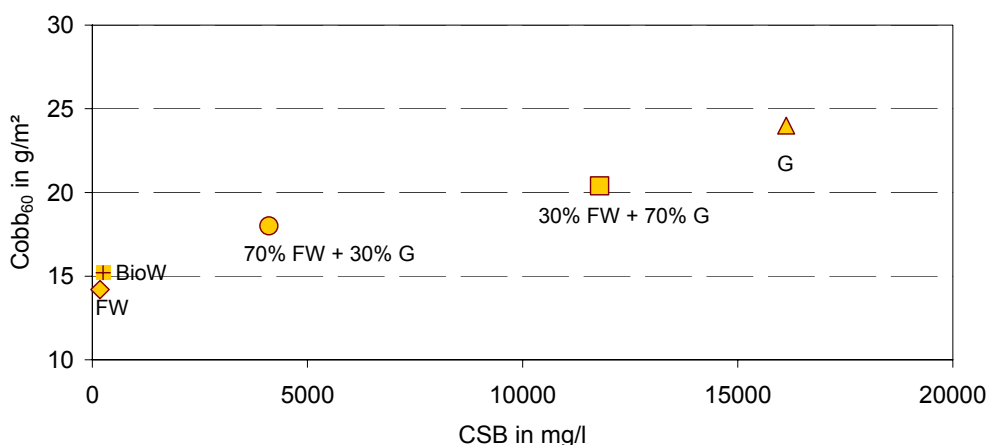
### 4.3 Einfluss der Wasserqualität auf die weiße Decke

**Weißer und Opazität** Bei Einsatz von Frischwasser (FW) wurde ein Weißgrad von 86 % erzielt, der mit zunehmender Zumischung von Klarwasser aus einem geschlossenen Kreislauf (G) bis auf 74 % abfiel. Biowasser (BioW) hatte einen geringeren negativen Einfluss. Signifikante Unterschiede in der Opazität traten nicht auf.



#### Leimung

Der Einfluss der Wasserqualität auf die Leimung wurde bei Einsatz von 1,4 % AKD bezogen auf den Faserstoff untersucht. Mit steigendem Austausch von Frischwasser (FW) durch Klarwasser aus einem geschlossenen Kreislauf (G) steigt die Wasseraufnahme der Papiermuster (als Cobb<sub>60</sub>) an; der Leimungsgrad wird geringer. Folgend ist der Zusammenhang wiederum in Abhängigkeit vom CSB-Wert dargestellt:



**Einhaltung der Leimungs-spezifikation**

Die in Werk A weit gefassten Cobb<sub>60</sub>-Werte würden auch bei Einsatz des Klarwassers aus einem geschlossenen Kreislauf ohne Erhöhung der Leimungsmittelmengen erreicht. Der negative Einfluss der Kreislaufeinengung führte in Werken mit höheren Anforderungen an die Leimung jedoch zu Problemen.

Durch Einsatz von Biowasser werden die Leimungswerte nicht signifikant gegenüber dem Frischwasser-Ansatz verschlechtert. Das Biowasser kann in der weißen Decke also ohne negativen Einfluss auf die Leimungswirkung eingesetzt werden.

## 5 Verfahren zur Wasserentfärbung

**Ziel**

Eine Wasserentfärbung soll es ermöglichen, im weißen Deckenstrang andere Wasserqualitäten als Frischwasser ohne relevante Einbußen in den optischen Eigenschaften einzusetzen. Verschiedene Verfahren wurden auf ihre Eignung zur Entfärbung von Kreislaufwasser und von biologisch gereinigtem Wasser (Biowasser) geprüft.

**Probenmaterial**

Flotations-Klarwasser aus einem Werk mit geschlossenem Wasserkreislauf (Kreislaufwasser) und Wasser aus dem Ablauf der vollbiologischen Reinigung eines Wellpappenrohropapier-Herstellers (Biowasser) wurden eingesetzt. Die in den Blattbildungsversuchen eingesetzten Wasserproben wiesen folgende Eigenschaften auf:

Parameter	Probe	Kreislauf-wasser	Bio-wasser
AFS	mg/l	1600	-
CSB <sub>filtriert</sub>	mg/l	19.900	192
Leitfähigkeit	mS/cm	12	3,2
Trübung	NTU	2.340	6,3
$\alpha_{254\text{nm}}$	m <sup>-1</sup>	-	130
$\alpha_{436\text{nm}}$	m <sup>-1</sup>	13,0	7,2
$\alpha_{525\text{nm}}$	m <sup>-1</sup>	4,5	2,0
$\alpha_{620\text{nm}}$	m <sup>-1</sup>	2,5	0,0

**Ozonisierung**

Die Proben wurden über ein Papierfilter (Schwarzband) vorab filtriert. In einer Ozonanlage wurden die Proben kontinuierlich ozonisiert. Der Ozoneintrag war 69 g Ozon/m<sup>3</sup> für Biowasser und 410 g/m<sup>3</sup> für Kreislaufwasser.

**Flockung und Fällung**

Die Proben wurden mit verschiedenen Flockungsmitteln und einem Flockungshilfsmittel versetzt, abgestimmt auf den kationischen Bedarf.

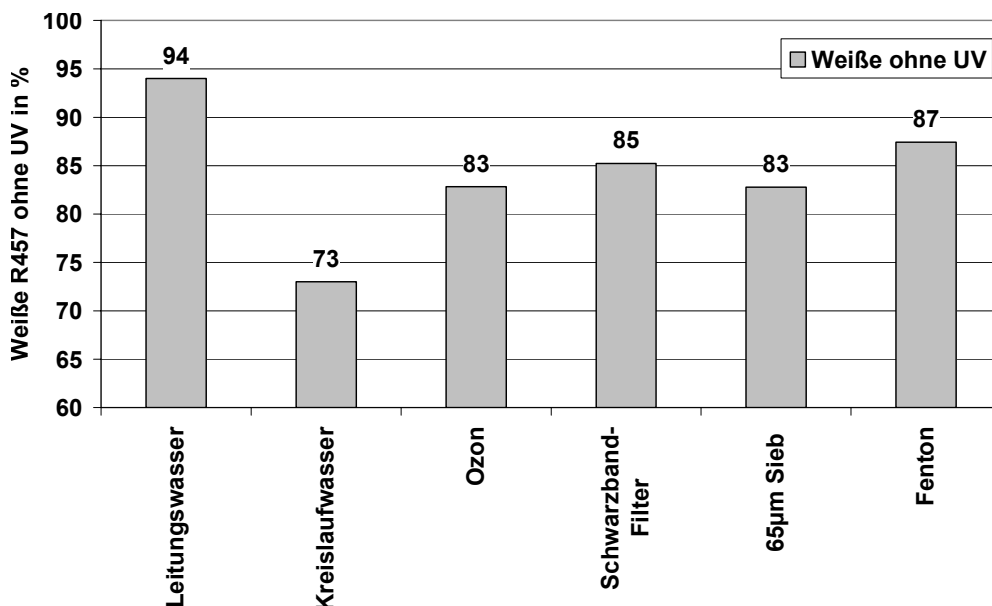
**Fenton-Prozess** Nach Vorversuchen wurde die Fenton-Behandlung an den vorab filtrierten Proben wie folgt ausgeführt: Zugabe von Eisen(II)-Sulfat 0,05 g/g CSB, Absäuern mit Salzsäure auf pH 2, Zugabe von Wasserstoffperoxid 2 g/g CSB, 18 h Rühren. Vor der Blattbildung wurde der pH-Wert der behandelten Wasserprobe mit 32 %iger NaOH auf 7 eingestellt.

**Feinfiltration** Die Proben wurden filtriert, zum einen über ein Schwarzband-Papierfilter, zum anderen über ein Blattbildungssieb mit 65 µm Maschenweite.

**Blattbildung** Es wurden jeweils 9 Nutschenblätter weißer Deckenstoff über ein Weißband-Filter gebildet. Als Referenzpunkte wurden Blätter mit Leitungswasser, unbehandeltem Kreislaufwasser und unbehandeltem Biowasser gebildet. Die Versuche mit Kreislaufwasser und mit Biowasser wurden mit unterschiedlichen Stoff-Chargen ausgeführt.

**Ergebnisse** Kreislaufwasser konnte durch Fällung/Flockung nicht weiter von farbtragenden Feststoffen befreit werden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Feststoffe im eingesetzten Klarwasser im Werk bereits in der Entspannungsflotation chemisch geflockt wurden. Mit einer zusätzlich getesteten Ultrafiltration war der Entfärbungseffekt insgesamt nicht besser als bei der Feinfiltration.

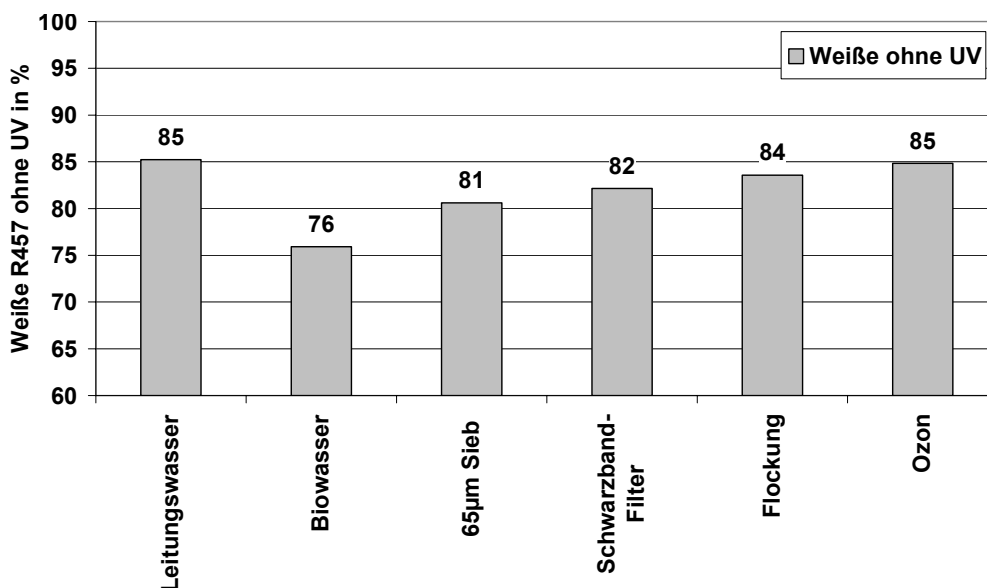
**Einfluss von Kreislaufwasser** Dem Weißgrad bei Einsatz von Leitungswasser, 94 %, stand bei Einsatz von unbehandeltem Kreislaufwasser ein Wert von 73 % gegenüber. Der Weißgradverlust kann durch die Entfärbungsverfahren reduziert werden:



Die stärkste Entfärbung wurde durch die Fenton-Reaktion erzielt, an zweiter Stelle standen die Filtrationstechniken (Schwarzband-Filter und 65 µm-Sieb). Der Einsatz von Ozon bot über die Filtration hinaus keinen Vorteil.

**Einfluss von Biowasser**

Die Weiße wurde von 85 % bei Einsatz von Leitungswasser auf 76 % bei Einsatz von unbehandeltem Biowasser reduziert. Dieser Weißgradverlust wurde durch die Entfärbungsverfahren in hohem Maße kompensiert. Eine dem Einsatz von Frischwasser vergleichbare Weiße konnte durch Behandlung mit Ozon sowie durch Flockung erzielt werden. Doch auch allein die Filtrationstechniken brachten beim Einsatz von Biowasser deutliche Weißgradgewinne.

**Übertragbarkeit**

Die erzielte Weißgrade sind relativ zu bewerten: Insbesondere die Stoffdichten, die Menge an gefärbtem Wasser im Vergleich zur Stoffmenge und die fehlende Kreislaufführung unterscheiden die Versuche vom Realprozess. Insgesamt überzeichnen die Versuche damit die Effekte der gefärbten Wässer. Da je nach Kundenspezifikationen bereits geringe Weißgradverluste nicht mehr akzeptabel sind, ermöglichen die Ergebnisse dennoch klare Aussagen.

**Diskussion**

Suspendierte Partikel tragen nach den Ergebnissen in erheblichem Maß zum Weißgradverlust der gebildeten Papiere bei.

Die Färbung durch Inhaltstoffe in Biowasser ist leichter oxidativ zu eliminieren als die in Kreislaufwasser. Dies kann jedoch alleiniger Effekt der weitaus höheren Gehalte im Kreislaufwasser sein, wie ein Vergleich der CSB-Werte nahe legt.

Trotz der guten Ergebnisse ist die Fenton-Reaktion praxisfern in ihrer Komplexität und in ihren Kosten. Insbesondere das Absäuern und das folgend notwendige Neutralisieren bedürfen eines inakzeptabel hohen Chemikalieneinsatzes.

## 6 Folgerungen für Belastungslimits und Wassereinsatz

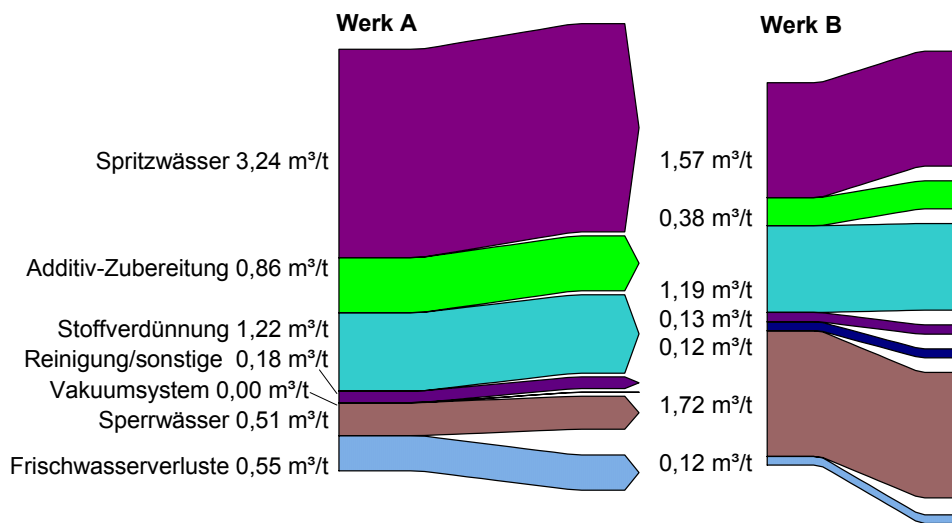
<b>Belastungslimits</b>	<p>Aus den Bahnbildnerversuchen ergibt sich für den untersuchten Fall:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eine Erhöhung des CSB-Werts in der braunen Lage ist nicht akzeptabel. Das Belastungslimit ist der Ist-Zustand. Der bei der Prozessuntersuchung ermittelte Wert war 3.700 mg/l.</li> <li>• Hinsichtlich der Papierqualität ist eine Erhöhung der Salzgehalte vertretbar. Kritisch zu betrachten sind jedoch auch andere Wirkungen von Ionen, insbesondere die korrosive Wirkung von Chlorid. Grenzwert ist hier 500 mg/l.</li> <li>• Im Mittel von zahlreichen Prozesswasseruntersuchungen der Forschungsstelle geht eine Chloridkonzentration von 500 mg/l in etwa mit einer Leitfähigkeit von 4000 <math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> einher. Bei dieser Leitfähigkeit ist auch nach den Literaturangaben noch kein relevanter negativer Effekt auf die Stärkeadsorption zu erwarten.</li> </ul>
<b>Einschränkungen in der Wassernutzung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Einsatz von "braunem" Prozesswasser in der weißen Decke ist nicht möglich.</li> <li>• Ein Frischwasser-Ersatz in der weißen Decke durch Biowasser ist dagegen möglich. Ein vorgeschaltetes chemisch-mechanisches Entstoffungsverfahren ist sinnvoll.</li> </ul>
<b>Übertragung auf andere Anwendungsfälle</b>	<p>Die festgelegten Belastungslimits gelten in erstem Ansatz nur für das untersuchte Werk und die hier betrachtete Sorte.</p> <p>Durch Anwendung des vorgestellten Verfahrens der Wassermischung und Bahnbildung ist eine detaillierte Festlegung von Belastungslimits auch in anderen Fällen möglich. Im Gegensatz zu anderen Sortenbereichen ist für Wellpappenroh papier hoch belastetes Wasser aus Werken mit geschlossenem Kreislauf für Versuche verfügbar. Dabei wird es zumeist ausreichen, Erhöhungen der Belastungswerte bis in etwa zum doppelten Wert des Ist-Zustands nachzustellen.</p>

## 7 Möglichkeiten der Frischwasser-Einsparung

<b>Ziel</b>	<p>Um Frischwasser einzusparen, ist zu prüfen, an welchen Frischwasser verbrauchenden Aggregaten und Teilprozessen der Einsatz reduziert oder Frischwasser durch eine andere Wasserqualität ersetzt werden kann. Dabei ist die Betriebssicherheit der Aggregate und Teilprozesse zu gewährleisten.</p>
<b>Methodik</b>	<p>Das gesamte Frischwassernetz wurde erfasst und die Volumenströme ermittelt. Für jeden Frischwasserverbraucher wurde eine Bewertung durchgeführt, ob eine Reduzierung des Frischwassereinsatzes, gegebenenfalls bei Ersatz durch Klarwasser, möglich ist (Stufe 1), und ob ein Ersatz von Frischwasser durch Biowasser möglich ist, wenn dieses zur Verfügung steht (Stufe 2). In der Summe wurde damit bewertbar, in welchem Ausmaß in den einzelnen Teilkreisläufen, die später in der Simulation abgebildet wurden, Frischwasser reduzierbar und/oder durch Biowasser ersetzbar ist.</p>

**Frischwasser-kategorien**

Werk A hatte einen spezifischen Frischwasserverbrauch von 6,7 m³/t, Werk B von 5,2 m³/t. Der Frischwasserverbrauch ließ sich wie folgt kategorisieren:



**Ansatzpunkte zur Reduktion**

Typische Stellen mit reduzierbaren Frischwassermengen wurden identifiziert. Diese entsprachen insgesamt den Erkenntnissen aus früheren Forschungsvorhaben [6, 7, 8].

**Einsparpotenziale**

Die reduzierten Frischwassermengen in Stufe 1 (kein Biowasser zur Verfügung) und Stufe 2 (Ersatz von Frischwasser durch Biowasser möglich) wurden am Beispiel von Werk A wie folgt ermittelt:

	Ist	Stufe 1	Stufe 2
	m³/t	auf m³/t	auf m³/t
STA D	0,84	0,84	0,00
STA S	0,00	0,00	0,00
STA E	0,21	0,00	0,00
STA R	0,00	0,00	0,00
PM1 D Nasspartie	0,27	0,27	0,02
PM1 S Nasspartie	0,35	0,18	0,02
PM1 Rest	2,96	1,76	0,52
PM2	1,10	0,80	0,00
andere	0,15	0,10	0,00
Frischwasserverluste	0,56	0,00	0,00
<b>Summe</b>	<b>6,4</b>	<b>3,9</b>	<b>0,6</b>

STA=Stoffaufbereitung

Für die Deckenlinie (STA D und PM1 D Nasspartie) ist in Stufe 1 nach den Ergebnissen von Kap. 6 keine Reduzierung möglich, in Stufe 2 ein Ersatz durch Biowasser denkbar.

**Diskussion**

Die Summierung des Verbrauchs zeigt: Ohne Umstellungen auf Biowasser benötigen wasserverbrauchende Aggregate und Prozesse mindestens 3,9 m³/t Frischwasser (Stufe 1). In Stufe 2, wenn Biowasser zur Verfügung steht, werden noch 0,6 m³/t benötigt. Die im geschlossenen Wasserkreislauf verbleibende Frischwassermenge von 1–1,2 m³/t ist dann also ausreichend, um Frischwasser benötigende Aggregate zu versorgen.

**8 Salz-Bilanzierung und Reduzierung des Salzeintrags**

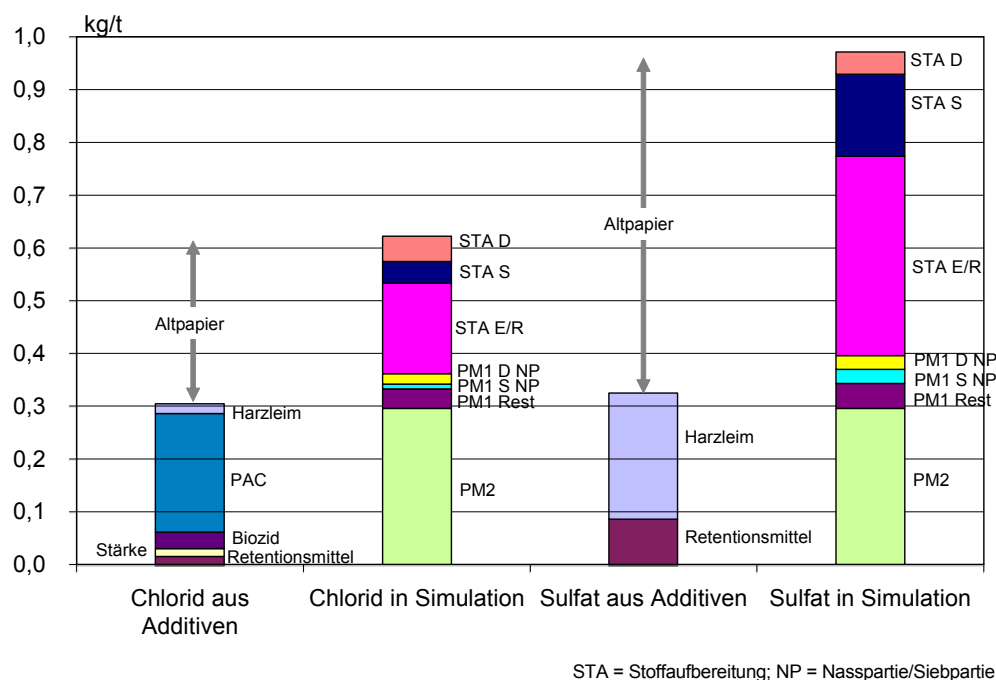
**Ziel und Methodik**

Die Salzquellen für den Wasserkreislauf sind zu bestimmen, um Ansatzpunkte zur Reduzierung des Salzeintrags herauszustellen. Die Ionen Chlorid und Sulfat wurden untersucht. Eine Bilanzierung wurde für Werk A durchgeführt.

Zum einen führt eine Analytik der Rohstoffe zu einem summarischen Eintrag. Dazu wurde die Chlorid- und der Sulfatabgabe aller eingesetzten Additive bestimmt. Zum anderen ist aufgrund der Bilanzierung im Simulationsmodell der Eintrag rückrechenbar. Bei der Kalibrierung der Simulationsmodelle (Kap. 9) wurden die Frachteinträge so eingestellt, dass sich die in der Anlage gemessenen Konzentrationen ergaben.

**Ergebnisse**

In folgendem Balkendiagramm sind für Werk A die aus den Additiven berechneten Chlorid- und Sulfateinträge und die in der Simulation in den Blöcken eingestellten Frachteinträge gegenübergestellt. Bei den analytisch bestimmten Einträgen offen gelassen wurden die Einträge über das Altpapier, die typischerweise im Bereich 0,3-0,6 kg/(t Bruttoproduktion) anzusetzen sind. Einträge über das Frischwasser sind nicht wiedergegeben.



**Diskussion**

Für Chlorid lässt sich die Differenz von ca. 0,3 kg/t zwischen den beiden Bestimmungsmethoden durch den im linken Balken angedeuteten Eintrag über das Altpapier erklären. Der hauptsächliche Eintrag erfolgt über Polyaluminiumchlorid an der PM2 und über das Altpapier für die braunen Lagen (STA E/R). Es konnte also eine hohe Kongruenz der Bestimmungsmethoden erzielt werden.

Bei Sulfat ist die Differenz der Balken, die dem Altpapier zuzuschreiben ist, mit ca. 0,65 kg/t hoch. Ursache sind stark sulfathaltige AP-Sorten oder Messfehler. Hauptquelle unter den Additiven ist der Harzleim, der an der PM2 eingesetzt wird. Hinter dem Sulfateintrag mit dem Retentionsmittel steht ein Polyacrylamid, das verteilt auf die Lagen der PM1 eingesetzt wird.

Aus den Ergebnissen lassen sich Maßnahmen zur Reduzierung der Salzeinträge für einen stark eingegengten Wasserkreislauf ableiten.

## 9 Simulation der Wasserkreislaufeinengung und -schließung

### 9.1 Ziel und Methodik

**Ziel**

Simulationsrechnungen werden eingesetzt, um die Auswirkungen von Verbesserungsmaßnahmen zu quantifizieren und Optimierungspotenziale zu bestimmen.

**Methodik**

Für jedes Werk wurde ein statisches Simulationsmodell mit dem IDEAS Dynamic Simulator der Firma Ideas Simulation and Control [19] aufgebaut. Die Modelle wurden in Bilanzelemente unterteilt, die die Teilkreisläufe der Stoffaufbereitungen und der Papiermaschinen und Reinigungsstufen repräsentieren. Bilanziert werden die Parameter Wasser, Feststoffe, CSB, nicht abbaubarer CSB (rCSB), Chlorid und Sulfat. Anhand der aufgenommenen Daten wurden die Modelle parametrisiert. Im nächsten Schritt folgten der Entwurf und die Simulation von Szenarien.

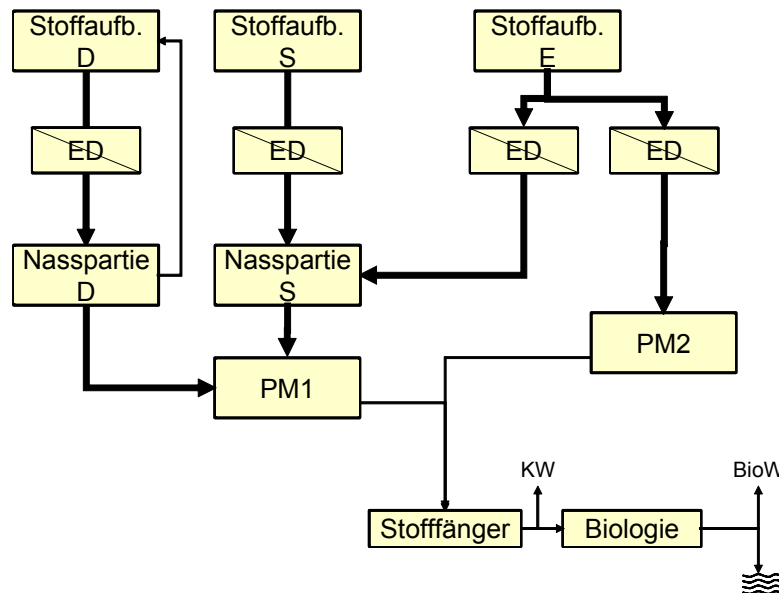
**Nicht abbaubarer CSB**

Die Abbaugrade von integrierten Anaerob- und Aerobverfahren verändern sich, wenn durch die Rezirkulation nicht abbaubarer (refraktärer) CSB im Wasserkreislauf angereichert wird. Prognosemodelle auf Basis des BSB<sub>5</sub> und der Angabe eines Sortenbereichs [20, 21] greifen in diesem Fall nicht. Die Berechnung erfolgt in Erweiterung früherer Forschungsergebnisse [22]. Ein Anteil der eingetragenen CSB-Fracht wurde als biologisch nicht abbaubarer CSB (rCSB) definiert. Für die biologischen Reinigungsstufen ist dieser rCSB inert. Bei einer Rückführung von biologisch gereinigtem Wasser sinkt damit der Wirkungsgrad der Biologie.



**Modellstruktur**

Im Folgenden stehen D für die weiße Decke, S für die Schonschicht und E für die Einlage und Rückseite des mehrlagigen Papiers. Um das Siebwasser der D- und S-Lage separat führen zu können, waren die Nasspartien bis jeweils zum Siebende als eigene Blöcke auszuführen. Dies ist für die braune Lage nicht notwendig. Folgendes Schema gibt die Blöcke und wichtigsten Wasserführungen wieder:

**Kosten**

Für den Kostenvergleich sind verschiedene Betriebskostenaspekte zu berücksichtigen. Zu Grunde gelegt wurden nach [23] typische Kosten für Wellpappenrohpaper-Erzeuger, die in Deutschland Direkteinleiter sind.

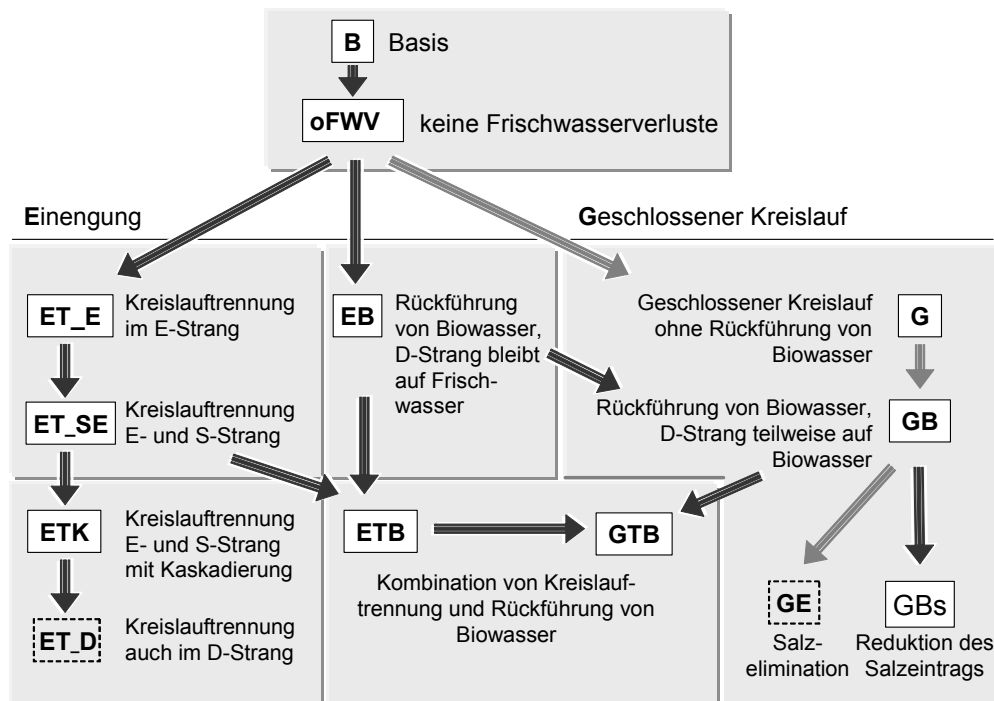
In allen Szenarien war eine Biologie vorgesehen; die Personalkosten wurden dabei als konstant veranschlagt und im Vergleich nicht berücksichtigt. Für eine Ozonisierung wurden 1,30 €/kg für die Ozonbereitung angesetzt [24], inklusive Pumpenergie und Peripherie wurden 2,0 €/kg Ozon veranschlagt.

Investitionskosten hängen in erheblichem Umfang von bereits vorhandenen Anlagen und den Randbedingungen ab. Sie werden daher nur diskursiv behandelt.

## 9.2 Szenarien

### Szenarienfolge

Die Gestaltungsmöglichkeiten Elimination von Frischwasserverlusten, Kreislauftrennung, Kaskadierung und Rückführung von Biowasser wurden in zum Teil aufeinander aufbauenden Szenarien in der Simulation umgesetzt:

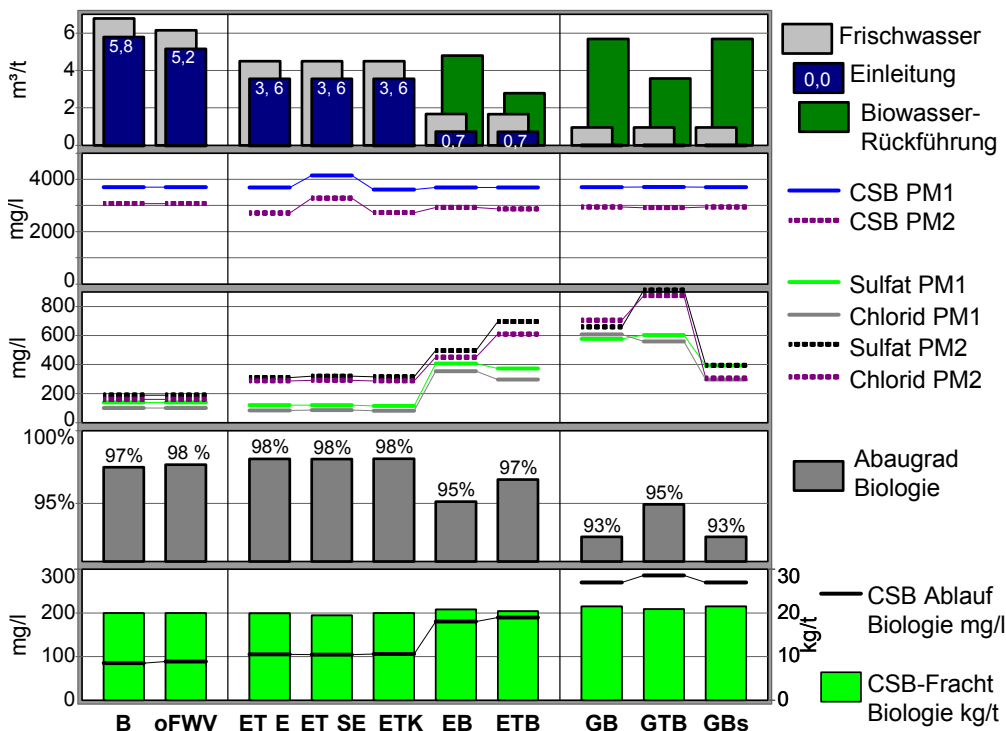


Szenario B (Basis) entspricht dem Ist-Zustand der Datenaufnahme.

Die Szenarien sind codiert, hierbei stehen als erste Buchstaben E für eingengter Kreislauf und G für geschlossener Kreislauf, dann T für Kreislauftrennung mit Gegenstromführung und B für Rückführung von Biowasser. Szenarien in gestricheltem Rahmen wurden nicht gerechnet.

**Ergebnisse im Überblick**

Die Szenarien erzielen eine zunehmende Einengung des Wasserkreislaufs. Der CSB-Zielwert an der betrachteten PM1 wurde durch Frischwassereinsparung und/oder Biowasser-Rückführung eingestellt.



**Szenario oFWV: Elimination von Frischw.verlusten**

Im Szenario wurden Frischwasserverluste von 0,64 m³/t eliminiert. Frischwasser kann hiermit eingespart werden, ohne dass die Belastungen des Wasserkreislaufs verändert werden.

**ET\_E: Kreislauftrennung im braunen Strang**

Ausgehend vom vorigen Szenario wurde eine Kreislauftrennung im Einlagestrang sowohl für die PM1 als auch für die PM2 bewirkt, durch

- Eindickung der Fertigstoffe auf 25 % Stoffdichte,
- vollständige Nutzung von PM-Überschusswasser in den Stoffaufbereitungslinien, also keine Ableitung zur Biologie, und
- Einsatz der Eindicker-Filtrate in der Stoffaufbereitung E, wobei deren Überschusswasser zur Biologie geführt wird.

Frischwasser wurde danach mit folgenden Vorgaben reduziert:

- Kein Frischwasser an die Stoffaufbereitungen S und E.
- Anteilige Reduzierung an PM1 und PM2, wobei die Bedarfe durch Frischwasserverbraucher beachtet werden.
- Frischwassermengen für Stoffaufbereitung D (Stoffverdünnung) und Nasspartie Decke (Spritzrohre) werden nicht verändert.

Frischwasser kann somit weiter eingespart werden.

---

**ET\_SE und ETK:  
Kreislaufftrennung im  
S-Strang,  
Kaskadierung**

In den beiden Szenarien ET\_SE und ETK ist zusätzlich und analog zum Einlagestrang eine Kreislaufftrennung im Schonschichtstrang umgesetzt.

- In Szenario ET\_SE werden dabei alle überschüssigen Eindickerfiltrate zur Biologie abgeleitet.
- In Szenario ETK wird überschüssiges Eindickerfiltrat der Schonschicht im Sinne einer Kaskadierung an die Stoffaufbereitung E gefahren.

Insgesamt zeigt eine Kreislaufftrennung im Schonschicht-Strang geringe Effekte, insbesondere da Schonschicht nur einen geringen Anteil des Gesamtstoffes ausmacht. Zudem ergibt die Bilanz der Schonschicht-Linie von Auflösung (ca. 90 % Stoffdichte des Altpapiers) bis Siebende (17 % Stoffdichte der Bahn vor Vergautschen) ein Wasserdefizit, das zum Teil durch Frischwasser, zum größeren Teil jedoch durch PM-Rückwasser gedeckt wird. Überschusswasser am Eindicker kann daher nur entstehen, wenn der Frischwassereinsatz im Strang erhöht wird – dies widerspricht einer Kreislauffeinengung – oder mehr Rückwasser von den Papiermaschinen gezogen wird.

Letzteres passiert im Szenario ET\_SE ohne Kaskadierung. Das PM-Rückwasser ist stärker CSB-belastet als der S-Strang selbst. In Folge steigt der CSB-Wert im Schonschichtstrang und an der PM1 an. Mit Kaskadierung (ETK) ergibt sich ein geringfügiger Entlastungseffekt für die PM1 (CSB 3.600 mg/l gegenüber 3.700 mg/l in Szenario ET\_E).

---

**ET\_D:  
Kreislaufftrennung  
auch im  
Deckenstrang  
(nicht simuliert)**

Noch ausgeprägter als die Schonschichtlinie ist die Deckenlinie durch ein Wasserbilanzdefizit geprägt. Ableiten ließe sich Abwasser aus der Stoffaufbereitung D nur durch erhöhten Frischwassereinsatz. Eine Gegenstromführung ist somit nicht realisierbar, eine Eindickung allein hätte keinen relevanten Effekt. Ebenso wenig ist ohne Überschusswasser eine Kaskadierung von Deckenstrang zu braunem Strang möglich.

---

**EB:  
Integrierte Biologie**

Ausgehend von Szenario oFWV wird in Szenario EB biologisch gereinigtes Wasser (Biowasser) in die Produktion zurückgeführt. Frischwasser ist reduziert und/oder durch Biowasser ersetzt, nach den Ergebnissen von Kap. 7, Stufe 2. Zur Einstellung des CSB-Zielwertes wird zudem weiteres Biowasser in der Stoffaufbereitung E eingesetzt. Die Frischwassermengen für Stoffaufbereitung D (Stoffverdünnung) und Nasspartie Decke (Spritzrohre) sind nicht verändert.

Mit einer verbleibenden Frischwassermenge von 1,7 m<sup>3</sup>/t können der Deckenstrang sowie empfindliche Frischwasserverbraucher im Bereich Additiv-Ansatz weiterhin mit Frischwasser versorgt werden. Durch die Rückführung von 4,8 m<sup>3</sup>/t Biowasser wird der CSB-Zielwert eingehalten.

Der Einleite-CSB-Wert steigt an. Dies ist im Hinblick auf Einleitegrenzwerte zu beachten.

---

---

**ETB:  
Kombination von  
Kreislaufftrennung  
und Rückführung**

Szenario ETB kombiniert eine Rückführung von Biowasser mit einer Kreislaufftrennung im Einlagestrang, wobei die Deckenlinie weiter mit Frischwasser versorgt wird. Biowasser wird im Sinne der Gegenstromführung an den Papiermaschinen eingesetzt. Ein Biowasser-Einsatz in der Stoffaufbereitung des abgetrennten E-Strangs widerspräche einer Gegenstromführung.

Wie in Szenario EB ist keine Kreislauffschließung möglich, solange die Deckenlinie und Additivverdünnungen mit Frischwasser beaufschlagt werden. Die notwendige Biowassermenge und damit die hydraulische Belastung der Biologie kann jedoch gegenüber Szenario EB verringert werden.

Zu beachten ist, dass die CSB-Frachtbelastung der Biologie dabei in etwa konstant bleibt – wie in allen anderen Szenarien (s. unterster Graph im Ergebnisüberblick, S. 27). Die Erklärung hierzu liegt in konstanten CSB-Einträgen und dem weitgehend konstanten CSB-Austrag über die Papierbahn. Die bilanzmäßige Differenz wird über die Biologie geführt und ist daher ebenfalls weitgehend konstant.

---

**G:  
Geschlossener  
Kreislauf ohne  
integrierte Biologie**

Eine vollständige Kreislauffschließung wurde in einer Vorab-Simulation berechnet, um maximale Belastungswerte festzustellen. Diese liegen in etwa bei:

CSB	25.000 mg/l
Chlorid	670 mg/l
Sulfat	1.000 mg/l

---

**GB:  
Geschlossener  
Kreislauf mit  
integrierter Biologie**

Wird der Wasserkreislauf geschlossen, reicht die verbleibende Frischwassermenge nicht aus, um die Deckenlinie vollständig zu versorgen. Um den Kreislauf zu schließen, wurde im Szenario GB die Wasserversorgung der Deckenlinie anteilig auf Biowasser umgestellt (0,72 l/kg von benötigten 1,1 l/kg).

---

**GB:  
Auswirkungen**

Im geschlossenen Wasserkreislauf verbleiben im Modell knapp 1 m<sup>3</sup>/t Frischwasser. Der Abbaugrad der Biologie fällt nun merklich ab, da nicht-abbaubare CSB-Anteile rezirkuliert werden.

---

**GBT:  
Geschl. Kreislauf mit  
integr. Biologie und  
Kreislaufftrennung**

Im Szenario GBT wird ausgehend von Szenarien ETB der Wasserkreislauf geschlossen. Hierzu muss der Deckenstrang teilweise mit Biowasser beaufschlagt werden.

---

**GBT:  
Auswirkungen**

Wie im Vergleich ETB zu EB bewirkt die Kreislaufftrennung eine Reduzierung der Hydraulik der Biologie, jedoch keine Änderung in deren CSB-Beaufschlagung. Die Salzbelastungen an der PM1 sind vergleichbar mit Szenario GB; an der PM2 ergeben sich jedoch hohe Werte.

---

**GE:  
Salzelimination  
(nicht simuliert)**

Forschungsergebnisse der letzten Jahre [22] wie auch in Papierfabriken vorübergehend realisierte Membranfiltrationsanlagen [4] belegen, dass eine funktionierende Salzelimination technisch aufwändig bis nicht realisierbar sowie unter heutigen Randbedingungen wirtschaftlich fraglich ist. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde eine Salzelimination auch in der Simulation nicht ausgeführt.

**GBs:  
Reduzierung des  
Salzeintrags**

Ein anderer Weg zur Minderung der Salzbelastungen ist die Reduzierung des Salzeintrags. Ausgehend von Szenario GB werden folgende Eintragsreduktionen als realisierbar angenommen (vgl. Kap. 8):

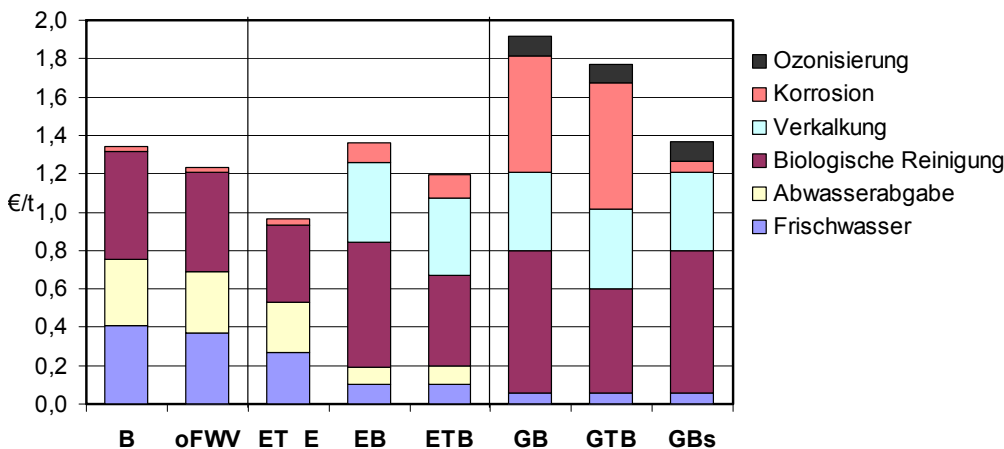
- keine chlorid- oder sulfathaltigen Additive an der PM2
- kein chloridhaltiges Biozid im Frischwasser
- Halbierung der Chlorid- und Sulfateinträge an der PM1
- kein Chlorideintrag in der Biologie (Eisen-III-Chlorid)

Die Chlorid- und Sulfatwerte an der PM1 können auf ein akzeptables Niveau von ca. 300 mg/l abgesenkt werden.

**9.3 Bewertung der Maßnahmen zur Kreislaufeinengung**

**Betriebskosten der  
Szenarien Werk A**

Die Betriebskosten der weiterhin relevanten Szenarien wurden abgeschätzt:



**Vollständigkeit der  
Kostenbetrachtung**

Die Belastungslimits an der Papiermaschine wurden mit den Szenarien eingehalten. Kosten oder Mehrerlöse durch eine geänderte Maschinenperformance oder eine veränderte Produktqualität sind daher nicht zu berücksichtigen.

Zu beachten sind jedoch mögliche Energieeinsparungen durch bessere Papierbahntwässerung bei höherer Kreislaufemperatur. Diese wurden nicht berechnet.

---

**Kostenvergleich: eingeeengter Kreislauf** Durch die Elimination von Frischwasserverlusten (Szenario oFWV) und durch die Kreislauftrennung (ET\_E) können Frisch- und Abwasserkosten eingespart werden. Die Rückführung von Biowasser (EB) reduziert diese Kosten zwar weiter, erfordert jedoch eine hydraulisch größer ausgelegte Biologie. Zudem können Kosten durch Maßnahmen gegen Verkalkung sowie durch Korrosion entstehen.

Den Einsparungen in den Betriebskosten steht im Szenario ET\_E der Investitionsaufwand für eine Kreislauftrennung gegenüber. Dieser umfasst insbesondere

- Eindicker,
- die Entstoffung des aus der Stoffaufbereitung auszuschleusenden Abwassers,
- getrennte Rückwasserbehälter für Papiermaschine und Stoffaufbereitung E und
- die Verrohrung für die Gegenstromführung.

Verfügt das Werk nicht bereits über diese Anlagenkomponenten, wird der Betriebskostenvorteil eine Kombination aus Rückführung von Biowasser und Kreislauftrennung (ETB) gegenüber nur einer Rückführung (EB) die Investitionsabschreibungen kaum ausgleichen können.

Im berechneten Fall erscheint damit die Kreislauftrennung (ET\_E) zwar gegenüber der Rückführung von Biowasser (EB) in den Betriebskosten günstiger. Diese Aussage lässt sich jedoch nicht verallgemeinern: Zu stark hängt der Kostenvergleich von den Randbedingungen ab.

---

**Kostenvergleich: geschlossener Kreislauf**

Den Einsparungen bei den Frisch- und Abwasserkosten im geschlossenen Kreislauf stehen Folgekosten in den Bereichen Kalk und Korrosion gegenüber. Je nach zu erzielendem Weißgrad des Produkts ist zudem gegebenenfalls eine Entfärbung durch Ozonisierung notwendig.

Korrosionsfolgen können dabei eventuell durch Additivumstellungen reduziert werden. Dies kann jedoch wiederum auf der Additivseite höhere Kosten auslösen.

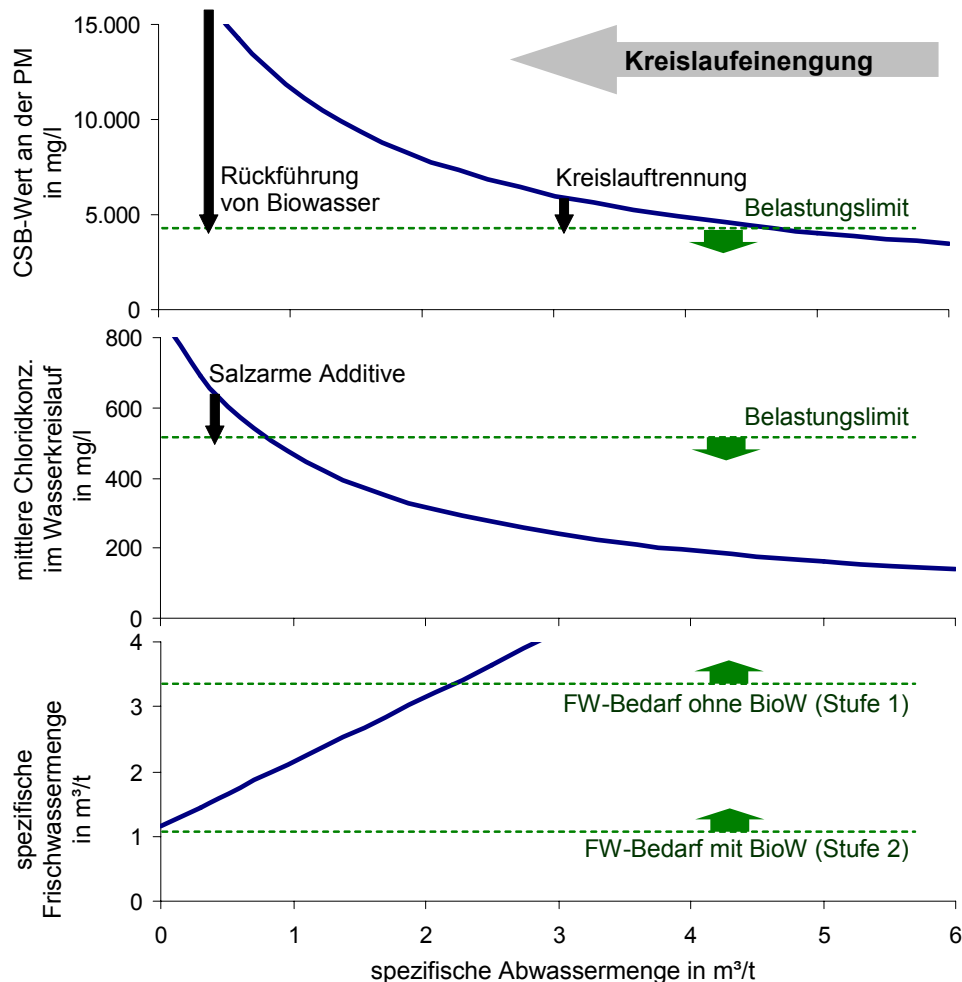
Insgesamt ist die Wasserkreislaufschließung im berechneten Beispielfall teurer als ein stark eingeeengter Wasserkreislauf. Diese Aussage lässt sich unter Abwägung der Varianz der hinterlegten Randbedingungen für einen Großteil der existierenden Papierfabriken im Sortenbereich weiß gedeckte Wellpappenrohapiere und darüber hinaus verallgemeinern. Dennoch ist eine Einzelfallbetrachtung stets notwendig und sinnvoll.

---

### 10 Regeln und Konzepte der Wasserkreislaufeinengung und -schließung

**Begrenzungen der Kreislaufschließung**

Zur Ableitung von Regeln und Konzepten sollen die verschiedenen Begrenzungen, die bei einer Kreislaufeinengung zu beachten sind, mit folgender Grafik in Zusammenhang gesetzt werden:



Die Zahlenwerte sind als Anhaltspunkte zu verstehen. Gestrichelt eingezeichnet sind die oberen Belastungslimits der Wasserqualität (vgl. Kap. 6) und die Minimalmengen des Frischwasserbedarfs (vgl. Kap. 7). Mit zunehmender Kreislaufeinengung werden nach und nach verschiedene Begrenzungen erreicht.



**Kreislauftrennung**

Die Kreislauftrennung mit Gegenstromführung im Einlagestrang ermöglicht die Kompensation eines durch Einengung gestiegenen CSB-Werts. Sind Fertigstoff-Eindicker in braunen Strängen vorhanden, sollten diese, ergänzt durch eine Gegenstromführung, zur effektiven Kreislauftrennung genutzt werden.

Eine Kreislaufeinengung auf 3–4 m<sup>3</sup>/t spezifische Abwassermenge ist durch eine solche Kreislauftrennung ohne Rückführung von Biowasser erzielbar. Die weitere Einengung stößt an Grenzen:

- Eine Übergabestoffdichte von 40 % lässt mit vertretbarem Aufwand nicht überschreiten, übliche Werte mit Siebbandpressen liegen bei 20–32 %.
- Mit fallender Produktionsabwassermenge wird die damit mögliche Gegenstromführung schwächer. Ohne Produktionsabwasser ist keine Gegenstromführung möglich.
- Im Sortenbereich ist die für wasserverbrauchende Aggregate und Prozesse notwendige Frischwassermenge im Vergleich zu anderen Sortenbereichen hoch (s. Grafik oben, Linie "FW-Bedarf ohne BioW (Stufe 1)"). Ursachen sind primär der Frischwasserbedarf der weißen Decke und mehrere Siebpartien.

**Integration von Reinigungsstufen/  
Rückführung von Biowasser**

Schlüssel zur weiteren Kreislaufeinengung ist daher die Integration eines CSB-eliminierenden Wasserbehandlungsverfahrens. Dies ermöglicht eine Kompensation des CSB-Anstiegs an der Papiermaschine auch bei Kreislaufschließung. Die biologische Reinigung bleibt hier das Verfahren der Wahl unter den Aspekten Wirtschaftlichkeit, Betriebsstabilität und Reststoffnutzung.

Steht Biowasser zur Verfügung, lässt sich zudem eine weitere Begrenzung der Kreislaufschließung überwinden, der Frischwasserbedarf. Zur Stoffverdünnung der weißen Decke sowie für weitere empfindliche Verbraucher wie die Siebkonditionierung kann Biowasser Frischwasser ersetzen.

**Anbindung einer integrierten Reinigung**

Die Anbindung einer biologischen Reinigungsanlage richtet sich danach, ob eine Kreislauftrennung installiert ist:

- Ohne Kreislauftrennung wird die Biologie mit Überschusswasser der Papiermaschine beaufschlagt. Das rückgeführte Biowasser wird nur soweit an empfindlichen Wasserverbrauchern eingesetzt, wie dafür kein Frischwasser mehr zu Verfügung steht. Weiteres Biowasser wird zur Stoffverdünnung z. B. in der Stoffaufbereitung eingesetzt.
- Bei installierter Kreislauftrennung wird die Biologie mit entstofftem Eindickerfiltrat beaufschlagt. Das rückgeführte Biowasser sollte im Sinne der Gegenstromführung an Wasserverbrauchern der Papiermaschine eingesetzt werden.

Für Aggregate, die mit Biowasser beaufschlagt werden sollen und die gegenüber Verkalkung und/oder Feststoffgehalten empfindlich sind, ist das Biowasser geeignet zu behandeln [25]. Zum Einsatz in der weißen Decke ist Biowasser nach den Ergebnissen von Kap. 5 von Feststoffen zu befreien und gegebenenfalls weitergehend zu entfärben.

---

<b>Bewusster Umgang mit Wasser</b>	Die Elimination von Frischwasserverlusten und ein bewusster Umgang mit dem Wassereinsatz einschließlich eines Verbrauchsmonitorings sind grundlegend für eine erfolgreiche Kreislaufreinigung.
<b>Salzgehalte</b>	<p>Weder eine Kreislaufftrennung noch eine Rückführung von Biowasser haben relevanten Einfluss auf die Sulfat- und Chloridgehalte im Papiermaschinenkreislauf.</p> <p>Auch falls die (Verkalkungs-)Probleme bei Membranverfahren zur Salzelimination technisch gelöst würden, oder wenn andere Verfahren wie die Vakuumeindampfung eingesetzt würden, gestaltete sich eine Salzelimination allein schon durch die zu entsorgenden Konzentratströme teuer.</p> <p>Durch Umstellung auf salzarme Additive ist die Problematik teilweise zu lösen.</p>
<b>Geschlossener Kreislauf</b>	<p>Auch im geschlossenen Wasserkreislauf kann es zu ungeplantem Abwasseranfall kommen. Für diese Fälle ist es vorteilhaft, die Option einer zeitweisen Indirekteinleitung offen zu halten.</p> <p>Inwieweit ein geschlossener Wasserkreislauf letztlich technisch vertretbar ist, hängt davon ab</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• ob das Problem hoher Salzgehalte lösbar oder tolerabel ist und</li><li>• ob die verbleibende Frischwassermenge ausreicht.</li></ul> <p>Vor einer Entscheidung zur Wasserkreislaufschließung sollte deren Wirtschaftlichkeit anhand aller aufgeführten Aspekte kritisch geprüft werden.</p>

---

### **Ansprechpartner für weitere Informationen**

Dr. Wolfram Dietz  
Tel. 089/12146-279  
[Wolfram.Dietz@ptspaper.de](mailto:Wolfram.Dietz@ptspaper.de)

Papiertechnische Stiftung PTS  
Heißstraße 134  
80797 München  
Tel. (089) 1 21 46-0  
Fax (089) 1 21 46-36  
E-mail: [info@ptspaper.de](mailto:info@ptspaper.de)  
[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de)

## Glossar

Abkürzung	Bezeichnung
A	Klarwasser aus Werk A (offener Kreislauf)
$\alpha_x$	spektraler Absorptionskoeffizient bei Wellenlänge x
AFS	Konzentration an abfiltrierbaren Feststoffe
AKD	Alkylketendimer, synthetisches Leimungsmittel
AP	Altpapier
BioW	Biowasser
Biowasser	Gereinigtes Wasser aus der biologischen Wasserreinigung
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
CMT	Concora-Prüfung, Flachstauchwiderstand
Cobb <sub>60</sub>	Leimungsgrad: Wasseraufnahme nach 60 s
D	Deckenlage (oberste Papierlage)
E	Einlage, braune Lage (mittlere, dickste Papierlage)
FW	Frischwasser (Leitungswasser)
G	Klarwasser aus Altpapier verarbeitender Papierfabrik mit geschlossenem Wasserkreislauf ohne integrierte biologische Reinigung
PCD	Titrationmessverfahren für kationischen/anionischen Bedarf
PDA	dynamische Penetrationsmessung
PM	Papiermaschine
R	Rückseite, Unterlage (unterste Papierlage)
Scott Bond	Messverfahren für Lagenhaftung
S	Salzzugabe
S	Schonschicht (Papierlage unter der Deckenlage)
SAK	Spektraler Absorptionskoeffizient
SCT	Streifenstauchwiderstand (short-span compression test)
STA	Stoffaufbereitung

## Literaturverzeichnis

- 1 VDP-PTS-Umfrage Wasser und Reststoffe 2001  
VDP, Bonn 2003
- 2 Diedrich K., Hamm U., Knelissen J. H.  
Biologische Kreislaufwasserbehandlung in einer Papierfabrik mit geschlossenem Wasserkreislauf  
Das Papier 51, V153-V159 (1997), Nr.6A
- 3 Bülow C., Pingen G., Hamm U.  
Schließung des Wasserkreislaufs einer Altpapier verarbeitenden Papierfabrik unter besonderer  
Berücksichtigung der Calcium-Problematik  
ipw - Das Papier T1-T16 (2003))
- 4 Wirth B., Kosse J., Welt T.  
Die Bedeutung des Wasserkreislaufs bei der Herstellung von Wellpappenrohpapieren  
Wochenblatt für Papierfabrikation 16, 974-978 (2005)
- 5 Bourgogne G., Laine J.E  
A review of the effects of reduced water consumption on the wet end of the paper machine and the  
quality of paper  
Paperi ja Puu 83, 3, 190-203 (2001)
- 6 Kappen J.  
Bestandsaufnahme und Verbesserung von Wasserkreisläufen in Papierfabriken mit integrierter  
Altpapierstofferzeugung  
Abschlussbericht AiF 9584 / PTS-Forschungsbericht 03/96  
München: PTS 1996
- 7 Kappen J., Dietz W.  
Reduzierung der spezifischen Abwassermenge durch Optimierung der Wasserkreisläufe in  
Papierfabriken mit integrierter Holzstofferzeugung  
Abschlussbericht AiF 10860 / PTS-Forschungsbericht 07/99  
München: PTS 1999
- 8 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
- 9 Kappen J., Hutter A., Bobek B., Hamm U.  
Anforderungen innerbetrieblicher Wasserverbraucher an Wasserqualität und -menge  
Abschlussbericht des VDP-INFOR-Projekts Nr. 52R, VDP, Bonn 2004
- 10 Hutter A., Kappen J., Trumpp C., Hamm U.  
Anforderungen innerbetrieblicher Wasserverbraucher an Wasserqualität- und Menge II  
Abschlussbericht des VDP-INFOR-Projekts Nr. 68R, VDP, Bonn 2005
- 11 Munz W., Tillmann O., Eisenschmid K.  
Salzbilanzierung einer Altpapieraufbereitungsanlage  
Wochenblatt für Papierfabrikation 5, S. 178-181 (1994)
- 12 Merckens C., Faber W.  
Erfolgreiche Optimierungen der Produktion einer Pappenfabrik mit Aluminiumnitratsulfat  
Wochenblatt für Papierfabrikation 131:20, 1198-1199 (2003)

- 13 Joore L., Coenen E.L.J., Verstraeten E.A.M., et al.  
Links between process water qualities and product properties - an integral approach to water management in papermaking  
Paper Technology 41:4, 47-56 (2000)
- 14 Wiseman N., Johannesen J.  
Influence of water system closure on strength properties of packaging papers  
Revue ATIP 54, S. 135-139 (2000)
- 15 Lee H.L., Ham C.H., Lee S.G.  
Influence of papermaking system closure on paper properties  
Tappi Journal 5:5, 27-31-SS (2006)
- 16 Strunz A.  
Entwicklungstendenzen bei der Erzeugung von Wellpappenrohpa-pieren  
Allgemeine-Papier-Rundschau 3, 29-36 (2006)
- 17 Brouwer P. H.  
Anionische Massestärke rein – Oberflächenstärke raus?  
Wochenblatt für Papierfabrikation 125:19, 928-937 (1997)
- 18 Wolf M.  
Stärkeinsatz bei der Kreislaufeinengung  
In: 1. PTS-Symposium: Einsatz von Stärke bei der Papiererzeugung  
Prof. Dr.-Ing. habil. J. Blechschmidt und Dr.-Ing. N.-O. Bergh (Hg.)  
München: PTS 1998, PTS-Manuskript SE–SY 858
- 19 [www.ideas-simulation.com](http://www.ideas-simulation.com)
- 20 Möbius C.H, Baumgarten H.L.  
Möglichkeiten zur Prognose der CSB-Konzentrationen biologisch gereinigter  
Papierfabriksabwässer  
Das Papier 39, Nr.10A, V44-V50 (1985)
- 21 Spörl R., Wagenknecht A., Demel I.  
Rest-CSB-Konzentrationen im biologisch gereinigten Abwasser Altpapier verarbeitender  
Papierfabriken  
Internationale Papierwirtschaft 6, 97-103 (2002)
- 22 Maeck K, Dietz W.  
Verringerung des Frischwasserbedarfs bei der Erzeugung holzfreier Druckpapiere ohne Qualitäts-  
und Produktivitätsverlust  
Abschlussbericht AiF 12810 / PTS-Forschungsbericht PTS-FB 16/03
- 23 Dietz W., Hamm U.  
Geschlossene Wasserkreisläufe unter besonderer Betrachtung des Betriebsaufwandes  
Abschlussbericht des VDP-INFOR-Projekts Nr. 74, VDP, Bonn 2006
- 24 Bierbaum S.  
Geregelte Ozonbehandlung von Abwässern aus der Produktion von Hygienepapieren  
F. Schmid und H.-J. Öller(Hrsg.): Betrieb biologischer Abwasserreinigungsanlagen – Welche  
Ablaufqualität brauchen Sie?  
München: PTS 2006, PTS-Manuskript PTS-MS 610
- 25 Demel I., Dietz W., Bobek B., Hamm U.  
Kriterien für die Rückführung biologisch gereinigter Wässer in die Produktion  
ipw – Das Papier 1, 37-40 und 2, 33-35 (2004)