

# Optimierung von Retention und Formation im Wet End von Papiererzeugungsanlagen durch modellgestützte Übertragung von Labor- und Technikumsergebnissen

C. Mannert, W. Dietz

## Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung</b> .....	<b>5</b>
1.1 Bedeutung von Retention, Formation und Flockung.....	5
1.2 Modellierung von Retention und Formation .....	6
1.3 Labor- und Technikumsversuche zur Bewertung von Retention und Formation.....	7
<b>2 Forschungsziel und Vorgehen</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>9</b>
3.1 Retentions- und Entwässerungsmessung im Labor- und Technikumsmaßstab .....	10
3.2 Korrelationsanalyse und Regressionsmodellierung .....	10
3.3 Untersuchte Papiermaschinen .....	11
<b>4 Betriebsdatenbasis und Online-Flockungssensor</b> .....	<b>11</b>
4.1 Betriebsdatenbestände.....	11
4.2 Betriebsuntersuchungen mit Online-Flockungssensor.....	12
4.3 Betriebsdatenmodelle .....	13
<b>5 Laborversuche</b> .....	<b>14</b>
5.1 Material und Methoden .....	15
5.2 Ergebnisse und Diskussion der Versuche zu PM A.....	15
5.3 Ergebnisse und Diskussion der Versuche zu PM B.....	17
5.4 Modellierung der Laborversuche .....	18
<b>6 Technikumsversuche mit Flockungssensor</b> .....	<b>22</b>
<b>7 Versuche an einer Pilotanlage, Modellierung</b> .....	<b>27</b>
<b>8 Übertragung vom experimentellen auf den Betriebsmaßstab</b> .....	<b>31</b>
8.1 Methodik .....	31
8.2 Übertragung PM A .....	32
8.3 Übertragung PM B .....	37
<b>9 Übertragbarkeit der Flockungsbewertung auf die Formation</b> .....	<b>39</b>
<b>10 Schlussfolgerungen</b> .....	<b>41</b>
10.1 Kriterien eines effizienten Vorgehens.....	41
10.2 Vorgehensweise zur Übertragung.....	42
10.3 Zusammenfassung, Nutzung der Ergebnisse .....	43
<b>Glossar</b> .....	<b>44</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>45</b>

## Zusammenfassung

<b>Zielstellung</b>	Ziel des Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Produktivität von Papiermaschinen bei Sicherstellung der Produktqualität durch eine Optimierung von Retention und Formation. Die Optimierung basierte auf datenbasierten Retentions- und Formationsmodellen, die mit Labor- und Technikumsversuchen kalibriert wurden.
<b>Versuche und Modellierung</b>	Versuche zu Retention, Formation und Entwässerungsleistung unter Variation von Additivdosierungen, Scherbedingungen, Stoffdichte und Temperatur wurden durchgeführt. Die experimentellen Stufen waren Labor, Technikumsdosierstrecke mit Flockungsmessung, eine Former-Pilotanlage sowie Daten und Modellierungsergebnisse von zwei Papiermaschinen. Die Versuchsergebnisse wurden mathematisch modelliert, um Einflüsse und Einflussstärken zu ermitteln.
<b>Übertragung</b>	<p>Die Einflussstärken der Additivdosierungen (Retentionspolymer und Nanopartikel) wurden zwischen den experimentellen Stufen und dem Betriebsmaßstab verglichen. Skalierfaktoren wurden berechnet, die die experimentell ermittelte Empfindlichkeit der Zielgrößen gegenüber den Einflussgrößen korrigieren. Damit sind Prognosen für den Betriebsmaßstab möglich.</p> <p>Die Skalierung wurde für die Dosierung von kationischem Polyacrylamid quantitativ ausgearbeitet. Einflussgrößen mit geringer Wirkung waren nicht mit Signifikanz im Betriebsmaßstab modellierbar und daher der Skalierung nicht zugänglich. Dies betraf die Dosierungen von Nanopartikel und von kationischer Stärke. Die Retention reagierte gegenüber Dosieränderungen bei den experimentellen Methoden insgesamt deutlich empfindlicher als im Betriebsmaßstab. Dies eröffnet die Möglichkeit, Retentionseffekte experimentell zu prognostizieren, die an der Betriebsanlage nicht mit Signifikanz nachweisbar sind.</p>
<b>Flockung und Formation</b>	Zur Prognose der Formation wurde sowohl an der Papiermaschine als auch im Technikumsmaßstab eine Flockungsmessung in der Stoffsuspension eingesetzt. Der Flockenindex an der Papiermaschine korrelierte mit der Papierformation. Störungen der Korrelation waren durch Änderungen der Formereinstellungen zu begründen. Die Nutzung des Flockenindex als Stützgröße ist eine neue Vorgehensweise, um Formationsergebnisse quantitativ von Technikumsergebnissen in den Betriebsmaßstab zu übertragen.
<b>Schlussfolgerung</b>	Erstmals konnten Skalierungsfaktoren für die Übertragung von experimentellen Ergebnissen zur Retention und Formation auf den Betriebsmaßstab formuliert werden. Damit stehen die Grundzüge einer Vorgehensweise zur modellgestützten Übertragung zur Verfügung. Die Vorgehensweise erlaubt, auf der Basis von experimentellen Ergebnissen wirtschaftlich relevante Prozess- und Produktgrößen der Papiererzeugung quantitativ zu beherrschen.

---

**Danksagung**

Das Forschungsvorhaben IGF 14812N der Forschungsvereinigung PTS wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen der Papier- und Zulieferindustrie für die Unterstützung der Arbeiten.

---

**Abstract****Title**

Optimising retention and formation in the paper machine wet end by the model-based scale-up of laboratory- and pilot-scale results

---

**Objectives**

The objective of this research project was to improve paper machine productivity whilst at the same time ensuring product quality by optimising retention and formation. Data-driven retention and formation models calibrated with laboratory- and pilot-scale trials form the basis for this approach.

---

**Trials and modelling**

Trials for retention, formation and dewatering performance were conducted whilst additive dosages, shear conditions, stock consistency and temperature were varied. A laboratory setup, a pilot dosage loop with flocculation measurement, a pilot former as well as data and modelling results from two paper machines all served as the experimental stages. The results were mathematically modelled to determine influencing variables and to assess the degree of influence of these input variables.

---

**Scale-up**

The degree of influence of additive dosages (retention polymer and nanoparticle) was compared between the experimental stages and the industrial scale. Scaling factors were calculated which correct the experimentally determined sensitivity of the target parameters relative to the influencing variables. This renders it possible to make forecasts for the industrial scale.

Scaling was developed quantitatively for the dosage of cationic polyacrylamide. Influencing variables with little effect could not be modelled with significance on the industrial scale and were therefore not accessible to scaling. This related to the dosages of nanoparticle and cationic starch. Retention, on the other hand, reacted to changes in dosage much more sensitively in the experimental methods than on the industrial scale. This presents the possibility of forecasting retention effects experimentally that cannot otherwise be determined with significance on the industrial scale.

---

---

**Flocculation and formation**

Flocculation measurements in the stock suspension both at the paper machine and on the pilot scale were employed to forecast formation. The flocculation index at the paper machine correlated with paper formation. The correlation was disrupted by changes in the former settings. The use of the flocculation index as a linking parameter is a new approach designed to quantitatively transfer formation results from pilot results to the industrial scale.

---

**Conclusions**

This was the first time ever that scaling factors were able to be formulated with a view to transferring experimental results on retention and formation to the industrial scale. This lays the foundations for an approach embodying a model-based scale-up. Such an approach permits economically relevant process and product parameters of the papermaking industry to be controlled quantitatively based on experimental results.

---

**Acknowledgements**

Research project IGF 14812N of the research association PTS was funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) through the German Federation of Industrial Cooperative Research Associations (AiF) within the scope of the "Industrial Co-operative Research" (IGF) promotion programme. We would like to express our gratitude for this support.

We would also like to express our appreciation to the participating companies in the paper and supply industries for their support during the project.

---

# 1 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung

## 1.1 Bedeutung von Retention, Formation und Flockung

<b>Retention</b>	<p>Der Begriff Retention bei der Papierherstellung ist definiert als der Anteil der Feststoffe der Suspension, der auf dem Blattbildungssieb zurückgehalten wird. Die Retention ist mit einer Vielzahl von Prozesswirkungen verbunden: Eine hohe Retention hält die Feinstoff- und Füllstoffbeladung des Primärkreislaufs gering. Dies vermeidet Ablagerungen und Reinigungsaufwand. Eine geringe Siebwasser-Stoffdichte entlastet das Kreislaufwasser-Reinigungsaggregat (Stofffänger). Feststoffverluste mit dem Abwasser können so begrenzt werden. Eine hohe Klarwasserqualität wird erzielt. Dies reduziert wiederum Anlagenausfälle und Reinigungsaufwand [1]. Eine hohe Retention sichert zudem die Stabilität des Wet End und erlaubt eine schnelle Reaktion auf Prozessänderungen [2]. Damit kommt der Retention eine wichtige Rolle für die Anlagenproduktivität zu.</p> <p>Eine niedrige Retention kann auf der anderen Seite die Papierqualität beeinträchtigen, da eine hohe Feinstoff- und Füllstoffbeladung des Primärkreislaufs Gradienten des Feinstoff- und Füllstoffgehaltes in z-Richtung des Papiers verstärkt, also zur Zweiseitigkeit führt. Eine hohe Retention ist weitergehend Voraussetzung für eine gute Leimungsmittel- oder Nassfestmittel-Effizienz.</p>
<b>Formation</b>	<p>Die Formation ist eine wichtige Qualitätsgröße des Papiers. Eine gute Formation liegt vor, wenn das Papier in der Durchsicht gleichmäßig erscheint. Dies ist der Fall, wenn die Blattbestandteile möglichst homogen verteilt sind, also Flocken wenig ausgeprägt und klein sind. Die Formation ist ein direktes Maß für die optische Qualität des Papiers, steht aber genauso im Zusammenhang mit Festigkeitseigenschaften und der Bedruckbarkeit [3, 4].</p>
<b>Zusammenhänge</b>	<p>Retention und Formation werden in weiten Teilen durch die gleichen Einstellgrößen des Prozesses gegenläufig bestimmt. Eine wesentliche Rolle spielen hier Flockungsphänomene: Eine starke Flockung bewirkt eine hohe Retention, aber eine schlechte Formation.</p> <p>Einfluss auf die Flockung nehmen die Faserstoffeigenschaften, die eingesetzten chemischen Additive und schernde hydrodynamische Einwirkungen. Stets sind weitere Zielgrößen des Prozesses und Produktes betroffen, wenn Retention und Formation beeinflusst werden. So hängt auch die Entwässerbarkeit des Stoffes mit der Flockung zusammen: Große Flocken begünstigen zuerst den Abzug von freiem Wasser am Sieb, können aber durch das in ihnen gebundene Wasser eine weitergehende Entwässerung behindern. Je nach Papiersorte und Qualitätsanforderungen werden auch die Luftdurchlässigkeit und Festigkeitswerte relevant beeinflusst [5, 6, 7].</p>

---

**Zusammenhang  
zwischen  
Flockung und  
Formation**

Die Formation wird durch die Faserflockung und die Scherbedingungen in der Blattbildungszone bestimmt. Auf Experimenten basierend wurden Korrelationen für unterschiedliche Papiermaschinen zwischen einem Formationsindex und der Flockungstendenz der Stoffsuspension beschrieben [8, 9, 10, 11].

Es wird eingeschätzt, dass die Blattformation zur Hälfte durch die Flockung der Suspension bestimmt ist [12]. Andere Einflüsse kommen aus dem Stoffauflauf und zu einem geringeren Anteil durch die Turbulenz am Siebtisch. Auf einer Pilotanlage wurde bei gleichen Entwässerungsbedingungen eine eindeutige Korrelation zwischen Formation und Flockenindex gemessen [13]. Die Faserflockung bestimmt also die Blattformation, solange die Einstellungen in der Formierzone konstant sind.

---

## 1.2 Modellierung von Retention und Formation

**Physikalische  
Modellierung der  
Retention**

Verschiedene Autoren modellierten die Retention auf physikalischer Basis. Shirt et al. implementierten ein theoretisches Modell von Flockung und Retention in ein Simulationsmodell [14, 15]. Die Kalibrierung basierte auf angenommenen Werten. Die Flockung wurde zur Retentionsprognose herangezogen. Auch Samkocwa et al. [16] verwendeten physikalische Modelle für die Retention, die Flockungsphänomene einbeziehen. Cho und Garnier [17] modellierten die Retention auf Basis der Kollisionstheorie, um Einflüsse der Komponenten eines Mikropartikelsystems, der Stoffdichte und des Füllstoffgehalts zu beschreiben. Angesichts der erheblichen Anzahl von Suspensionskomponenten und deren schwer messtechnisch beschreibbaren Eigenschaften ist davon auszugehen, dass die herangezogenen Theorien der Polymer-Adsorption und Flockung reale Stoffsysteme für die Praxis ausreichend genau abbilden können

---

**Datenbasierte  
Modellierung der  
Retention**

Daher entwickelten einige Autoren datenbasierte Modelle der Retention. Donat et al. [18] modellierten die Feinstoffretention linear als Funktion von Additivdosierungen mit Versuchsdaten an einer Feinpapiermaschine. Cho et al. [19] verwendeten experimentell parametrisierte lineare Gleichungen, um die Wirkungen des Füllstoff-Massenstroms und der Komponenten eines Mikropartikelsystems auf Retention und Aschegehalt des Papiers dynamisch zu beschreiben.

Huber et al. [20] verglichen den Einfluss von Retentionssystemen bei verschiedenen Scherraten auf die Balance zwischen Füllstoffretention und Flockung an einem Versuchsstand. Anhand von polynomischen Modellen zweiter Ordnung und deren Darstellung als Graphen wurden Optimalpunkte identifiziert. Methodisch ist dies ein erster Ansatz zur modellbasierten Optimierung von Retention und Formation, wobei hier nur Aussagen über die Flockung getroffen wurden.

---

---

**Physikalische Modellierung der Formation**

Physikalische Modellierungsansätze für die Formation beziehen sich auf die Stoffflockung als Vorstufe der Formationsausprägung [21, 22]. Diese Betrachtung ist dann durch ein zweites Modell zu den Einflüssen der Maschineneinstellungen ab Stoffauflauf zu ergänzen [23]. Cho et al. [24] modellierten die Formation direkt als eine Funktion des Crowding-Faktor, Bindungsstärke zwischen einzelnen Fasern, Füllstoffretention und Füllstoffanteil im Stoffauflauf.

---

**Datenbasierte Modellierung der Formation**

Einen datenbasierten Ansatz zur Formationsmodellierung wählten Yli-Fossi et al. [25]. Die Formation wurde aus Daten einer Papiermaschine durch lineare Regression modelliert. Die Autoren strebten eine Online-Anwendung mit kontinuierlicher Rekalibrierung des Modells an. Lenz et al. [26] nutzten Neuronale Netze. Ihr Modell verwendete 32 Inputs. Es wurde als Softsensor an einer Papiermaschine implementiert, um Formationswerte früher als durch Labormessungen bereitzustellen.

---

**Modellierung zur Einflussanalyse**

Die vorgestellten Arbeiten zur datenbasierten Modellierung hatten vorrangig eine Prognose zum Ziel. Die datenbasierte Modellierung lässt sich auch zur Analyse von Einflüssen heranziehen. Um für einen Prozess die Einflüsse auf eine Zielgröße zu identifizieren und zu gewichten, werden relevante unabhängige Einflussgrößen (Inputvariable) im Schritt der Variablenselektion ausgewählt. Dann lassen sich mit dem Modell Einflussgewichte der einzelnen Variablen berechnen. Auch für die parallele Modellierung verschiedener Untersuchungsmaßstäben im vorliegenden Forschungsvorhaben war es notwendig, Einflussgrößen bewusst auszuwählen und die Einflussstärken zu ermitteln.

---

### 1.3 Labor- und Technikumsversuche zur Bewertung von Retention und Formation

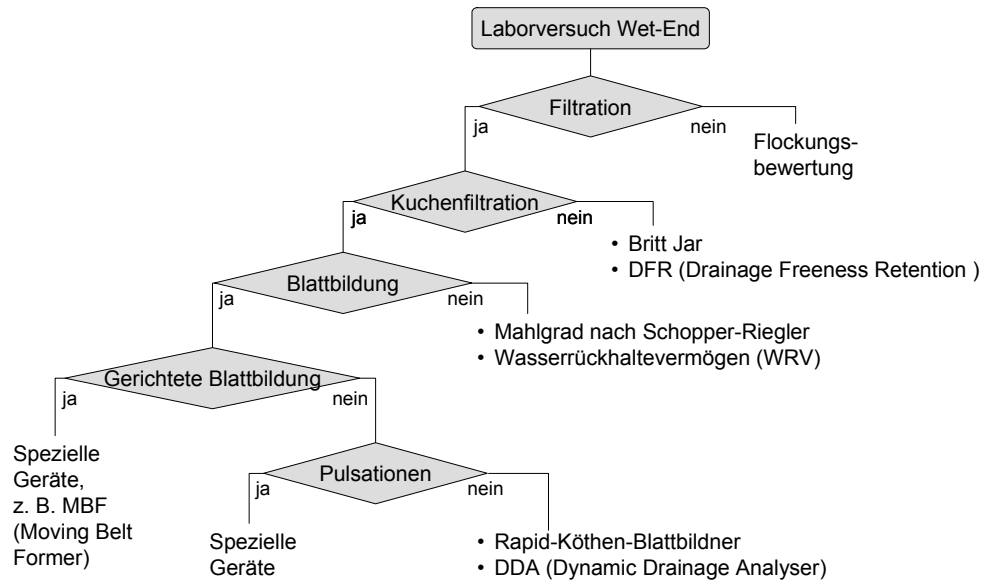
**Entwicklung**

Labor- und Technikumsexperimente können die Suche nach optimalen Einstellungen der Papiermaschine im Wet End unterstützen. Die Laboreinrichtungen sollen dabei so gestaltet werden, dass sie die Vorgänge der Blattbildung gut abbilden, differenzierende Ergebnisse liefern, reproduzierbar und vom Bediener unabhängig sind und mit deutlich geringerem Aufwand als Betriebsversuche durchführbar sind.

---

## Auswahl

Kein einzelner Laboraufbau erfüllt diese Anforderungen, wenn Messgrößen wie, Retention, Formation und Entwässerungsleistung gleichzeitig bestimmt werden sollen [27]. Grundsätzliche Entscheidungen bei der Auswahl des geeigneten Geräts gibt folgendes Schema wieder (in Anlehnung an [27]). Zahlreiche Geräte wurden entwickelt, sind aber nur zum Teil käuflich verfügbar. Beispiele sind Britt-Jar [28]; DFR-04 [29]; Mahlgrad nach Schopper-Riegler [30]; WRV [31]; MBF [32]; DDA [33] und Rapid-Köthen-Blattbildner [34].



## Auswahlkriterium Kuchenfiltration

Die zentrale Entscheidung ist die der Kuchenfiltration. Zur Untersuchung der Entwässerungseigenschaften der Stoffsusension ist eine Kuchenfiltration notwendig, entweder ohne Vakuum (Mahlgrad-Bestimmung), durch Zentrifugalkraft (Wasserrückhaltevermögen WRV) oder mit Vakuum. Bei Methoden mit Vakuum kann am gebildeten Blatt nach Trocknung in der Regel die Papierqualität untersucht werden.

Zur Bestimmung der Retention sind Filtrationsversuche ohne Kuchenbildung dann vorteilhaft, wenn die Beeinflussung der Feinstoff- und Füllstoffretention im Vordergrund steht. Die Fixierung von Feinstoffen und Füllstoffen an die Fasern lässt sich differenzierter beobachten, wenn der nivellierende Einfluss einer Rückhaltung im Filterkuchen außen vor gelassen wird.

Laborversuche werden in erster Linie zur Auswahl geeigneter Additivsysteme eingesetzt. Ein weiterer Einsatz ist die Vor-Optimierung der Dosierung einer oder mehrerer Mittel. Hier zeigen sich jedoch grundsätzlich starke Verschiebungen zwischen den im Versuch und den im Betrieb notwendigen Dosiermengen.



## 2 Forschungsziel und Vorgehen

<b>Ziel</b>	Ziel des Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Produktivität von Papiermaschinen bei gleichzeitiger Sicherstellung der Produktqualität durch eine Optimierung von Retention und Formation. Die Optimierung basiert auf datenbasierten Retentions- und Formationsmodellen, die mit Labor- und Technikumsversuchen kalibriert werden. Damit soll eine optimale Einstellung von numerisch variierbaren Einflussgrößen des Wet End, insbesondere Retentionsmitteldosierungen, rechnerisch ermittelt werden können.
<b>Gesamtvorgehen</b>	Im Forschungsvorhaben wurden anhand von zwei Modellfällen im Betriebsmaßstab und in verschiedenen experimentellen Maßstäben Einflüsse auf die Zielgrößen Retention und Formation untersucht und mathematisch modelliert. Darauf aufbauend wurde die quantitative Übertragbarkeit von experimentellen Ergebnissen auf den Betriebsmaßstab mit dem Ziel einer Prognose untersucht.
<b>Datenbasis und Modellierung</b>	Modelle des Betriebsmaßstabs wurden aus früheren Forschungsarbeiten [35] übernommen. Darüber hinaus wurde ein Modell zur Beschreibung der Flockung im Betriebsmaßstab erstellt, basierend auf Flockengrößenmessungen mit einem Online-Flockungssensor (Kap. 4). Laborversuche zu Retention und Entwässerung wurden mit dem Stoff- und Additivsystem der untersuchten Papiererzeugungsanlagen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mathematisch modelliert (Kap. 5). Versuche im Technikumsmaßstab dienten dazu, die Flockung als Stützgröße für eine Formationsprognose zu erfassen (Kap. 6). Versuche an einer kleinen Pilotanlage, an der auch die Papierformation bestimmt werden konnte, wurden als weitere experimentelle Stufe einbezogen (Kap. 7).
<b>Übertragung</b>	Dann wurden die Modelle der verschiedenen Maßstäbe verglichen (Kap. 8). Übertragungsfunktionen (Skaliermodelle) wurden berechnet. Die Übertragbarkeit der Flockungsmessungen auf die Formation wurde untersucht (Kap. 9). Schlussfolgerungen und eine Ausblick auf die Nutzung der Erkenntnisse finden sich in Kap. 10.

## 3 Material und Methoden

<b>Material und Methoden</b>	Übergreifend eingesetzte Materialien und Methoden sind folgend aufgeführt, spezielle Materialien und Methoden bei den einzelnen Arbeitsschritten.
<b>Konventionen</b>	Retentionswerte werden als Prozentpunkte im Wertebereich 0–100 angegeben. Flockungsindex- und Formationsindex-Werte stehen ohne Einheit. Regressionskoeffizienten werden in Tabellen vereinfacht ohne Einheiten angegeben. Additivdosierungen werden spezifisch als Handelswaremengen bezogen auf Produktionsmenge oder Stoffdurchsatz angegeben.

### 3.1 Retentions- und Entwässerungsmessung im Labor- und Technikumsmaßstab

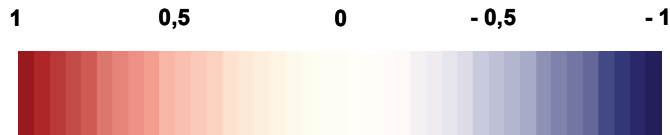
<b>DFR-04</b>	Das Laborgerät "Drainage Freeness Retention" (DFR-04) der BTG Instruments GmbH ähnelt einem automatisierten Schopper-Riegler-Messgerät, ermöglicht jedoch zusätzlich, definierte Scherenergien über einen Rührer einzubringen. Hierdurch lassen sich Scherbedingungen der Papiermaschine annähernd nachstellen.
<b>Dosierphase</b>	Zur Faserstoffsuspension in der Rührkammer werden zeitprogrammiert Additive zugegen, die Suspension wird einer vordefinierten Folge von Scherbelastungen (Scherprofil) unterworfen.
<b>Entwässerungsmessung</b>	Im Entwässerungsmessmodus wird nach der Dosierphase das Filtrationsventil freigegeben. Das Filtratgewicht über die Entwässerungszeit wird gravimetrisch erfasst. Der Entwässerungswert gibt die entwässerte Menge nach einer vordefinierten Zeit an. Standardmäßig werden die $D_{30}$ und $D_{60}$ Werte gemessen. Hohe Werte stehen für eine schnelle Entwässerung und eine hohe Entwässerungsleistung.
<b>Retentionsmessung</b>	Im Retentionsmodus wird während der Filtrationsphase weiterhin gerührt, es bildet sich kein Faservlies aus. Die Stoffdichtemessung kann durch einen im Filtratstrom angebrachten Stoffdichtesensor oder manuell nach der Durchführung erfolgen.

### 3.2 Korrelationsanalyse und Regressionsmodellierung

<b>Paarweise Korrelation</b>	Die Korrelationsanalyse ermittelt Zusammenhänge zwischen den Variablen in einem Datenbestand. Berechnet werden die paarweisen Pearsonschen Korrelationskoeffizienten $R$ . Sie geben an, inwieweit zwei Variable gemeinsam linear variieren.
<b>Signifikanztest</b>	Die Überprüfung der Signifikanz der Korrelationen erfolgt über den F-Test. In den Untersuchungen wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ hinterlegt (5 % maximal zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit).

**Korrelationsmatrix**

Paarweise Korrelationskoeffizienten für mehrere Variable werden in einer Korrelationsmatrix dargestellt. Die Angabe der Korrelationskoeffizienten wird durch das Farbschema mit dunkelroten Farbtönen für eine stark positive und mit dunkelblauen Farbtönen für eine stark negative Korrelation ergänzt. Nur Korrelationen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit unter 5 % werden dargestellt.

**PLS-Modellierung**

Zielgrößen wurden zum Teil mit PLS (Partial least squares)-Regression modelliert. Die PLS-Modellierung ist eine gegenüber Kollinearitäten unempfindliche lineare Regressionsmodellierung [36].

Für das PLS-Verfahren eignet sich zur Variablenselektion neben dem normierten Regressionskoeffizienten auch die VIP-Kennzahl (Variable Importance in the Projection). Diese gibt die Einflussstärke der einzelnen im Modell verwendeten Inputs wieder [37].

**3.3 Untersuchte Papiermaschinen**

**Papiermaschinen** Die Untersuchungen wurden anhand der Daten zweier Papiermaschinen zur Produktion holzfreier grafischer Papiere durchgeführt.

	<b>PM A</b>	<b>PM B</b>
<b>Rohstoffe</b>	Langfaserzellstoff, Kurzfasierzellstoff, holzhaltiger Faserrohstoff in geringen Mengen	Langfaserzellstoff, Kurzfasierzellstoff
<b>Siebpartie</b>	Hybridformer; Verdünnungstoffauflauf;	Hybridformer
<b>Retentionssystem</b>	Nanopartikelsystem basierend auf Polyacrylamid	Nanopartikelsystem basierend auf kationischer Stärke

**4 Betriebsdatenbasis und Online-Flockungssensor****4.1 Betriebsdatenbestände****Betriebsdatenmodelle**

Die Betriebsdatenbasis und Betriebsdatenmodelle wurden aus [35] übernommen. Die Betriebsdatenbasis wird folgend charakterisiert.

**Messtechnik**

In den Datenbeständen von PM A und PM B liegt den zentralen Messgrößen folgende Messtechnik zugrunde:

	<b>PM A</b>	<b>PM B</b>
<b>Gesamtretention</b>	optisches Stoffdichte-Messsystem	Trübungssonde
<b>Ascheretention</b>		- nicht erfasst -
<b>Formation</b>	Laser (Epair1D, Techpap, Frankreich)	Laser (FMS 850, Vacutec Messtechnik)

Der Laser-Formationssensor FMS 850 erlaubt eine differenzierte Bewertung der Formation. Der Formationsparameter  $F_a$  steht für den Kontrast. Er gibt die mittlere lineare Abweichung des Profils vom Mittelwert wieder. Der Parameter  $F_{wi}$  bewertet die Wolkigkeit über die mittlere Größe dunkler Bereiche.

Die Entwässerungsleistung konnte an den Papiermaschinen nicht erfasst werden.

## 4.2 Betriebsuntersuchungen mit Online-Flockungssensor

**Prinzip**

Stützgröße der Formationsübertragung ist die Messung der Flockung sowohl im Technikums- als auch im Betriebsmaßstab. Im Betriebsmaßstab wurde an der PM A der Flockungssensor FlocSens des CTP (Grenoble, Frankreich) eingesetzt. Die kontinuierliche Messung erfolgte parallel zur Erfassung der anderen Betriebsdaten.

**Messmethode**

Der FlocSens erfasst über eine Kamera den Flockungszustand der Suspension in einer durchströmten, flachen und transparenten Messzelle und wertet ihn bildanalytisch aus. Der innere Wandabstand der Messzelle ist 3,5 mm. Für die Flockungsmessung im Hinblick auf Formation ist eine Bewertung auch größerer Flocken (> 3 mm) erforderlich [38].

**Einsatz**

Der Flockensensor wurde im Dünnstoff des füllstoffhaltigen Stoffsystems der PM A eingesetzt. Hierzu wurde das Messsystem für eine Dauer von 5<sup>1/2</sup> Wochen an die Rezirkulation des Stoffauflaufes angeschlossen.

**Auswertung der Flockungsmessung**

Die Bildanalyse wertet für eine Flockengrößenverteilung 225 Bilder von einer Fläche 60 mm x 60 mm aus. Die Flockengrößenverteilung lässt sich darstellen als Histogramm mit der Flockengröße  $s$  innerhalb jeder Größenklasse  $i$  bei gleichem Flockendurchmesser  $D_i$  [22]. Der Flockenindex  $FI$  berechnet sich nach

$$FI = \sum_i s_i D_i^2. \quad (1)$$

Höhere Werte beschreiben größere Flocken. Die Messungenauigkeit der Flockenindex liegt bei etwa  $\pm 5$  Einheiten.

### 4.3 Betriebsdatenmodelle

#### Prinzip

Als Ausgangspunkt der weiteren Arbeiten sind die folgend die Regressionskoeffizienten der Betriebsdatenmodelle dargestellt. Eine vollständige Beschreibung der Modellierung findet sich in [35]. Für PM A wurde zudem ein Modell des Flockenindex erstellt.

#### Übersicht Regressionskoeffizienten, PM A

Die Modelle wurden durch PLS-Modellierung des gesamten Datenbestands erstellt:

Zielgröße	Einflussgröße	Regr.koeff.	R <sup>2</sup>
Flockenindex (FlocSens)	Kat. Polyacrylamid cPAM in %	3,579	<b>0,62</b>
	Langfaseranteil LF in t/t	296	
	Holzhaltiger Faserrohstoff in t/t	-1,17	
	Füllstoffzugabe t/t	0,89	
	Mahlleistung Kurzfaser in kW	0,026	
	Gesamtmenge Stoffauflauf in l/min	-0,007	
Formation	cPAM in %	52	<b>0,67</b>
	NP in %	26	
	Langfaseranteil LF in t/t	42	
	Strahl-Sieb-Verhältnis	-150	
Gesamtretention in %	Maschinengeschw. in m/min	-0,028	<b>0,50</b>
	cPAM in %	70	
	Füllstoff in t/t	0,071	
	Mahlleistung Kurzfaser in kW	0,0084	
Ascheretention in %	Flächenmasse Papier	0,28	<b>0,65</b>

#### Übersicht Regressionskoeffizienten, PM B

Für PM B wurden die Modelle der Formation (Fa und Fwi) auf der Basis von Betriebsversuchen und das Modell für die Gesamtretention auf der Basis von drei PLS-Modellen erstellt. Folgende Regressionskoeffizienten wurden ermittelt:

Zielgröße	Einflussgröße	Regr.koeff.
Fa (Kontrast)	Ungestrichener Ausschuss in %	0,053
	Lippenöffnung in mm	-0,56
	NP in %	-0,58
	Kat. Stärke (ZS) in %	0,091
Fwi (Wolkigkeit)	Ungestrichener Ausschuss in %	0,055
	Lippenöffnung in mm	-0,052
	NP in %	-0,31
	Kat Stärke (ZS) in %	-0,22
Gesamtretention in %	Lippenöffnung in mm	1,2
	Kat. Stärke (ZS) in %	14

Der Einfluss der kationischen Stärkedosierung im Dünnstoff (Konstantteil) auf die Retention an PM B, der zum Vergleich mit experimentellen Daten später interessant ist, konnte aus dem Datensatz nicht eindeutig bestimmt werden.

---

**Modellgüte**

Die Modelle wiesen insgesamt moderate bis gute Modellgüten auf und eigneten sich dazu, wesentliche Änderungen in den Zielgrößen zu prognostizieren. Einschränkungen in den Modellaussagen und -güten ergaben sich durch Multikollinearität, also dadurch, dass in den Daten aus dem Normalbetrieb der Anlagen aufgrund der Betriebsführung Einflussgrößen miteinander korrelieren, ohne kausal verknüpft zu sein.

---

**Einordnung der Ergebnisse im Hinblick auf die Übertragung**

An den Papiermaschinen wurden verschiedene Retentionssysteme eingesetzt. Eine Erhöhung der Retention durch Retentionskomponenten entspricht der Erwartung. Auch die anderen ermittelten Einflüsse und Einflussrichtungen sind prozesstechnisch plausibel [5].

Schwer interpretierbar ist nur eine Erhöhung der Retention mit Vergrößerung der Lippenöffnung bei PM B. Mit steigender Lippenöffnung fällt die Stoffauflaufstoffdichte bei gegebenem Strahl-Sieb-Verhältnis. Eine niedrigere Stoffdichte lässt aufgrund einer geringeren Flockung eine schlechtere Retention erwarten. Die Verbesserung der Formation mit größerer Lippenöffnung entspricht dagegen der Theorie und Erfahrung.

Dazu, ob und wie das Strahl-Sieb-Verhältnis die Retention beeinflusst, sind uneinheitliche Ergebnisse veröffentlicht [39]. Der Zusammenhang hängt davon ab, ob mit Über- oder Unterstau gearbeitet wird, und ist ausgeprägt nichtlinear [5]. Effekte der Flockenscherung überlagern sich mit solchen der initialen Entwässerung am Sieb.

---

## 5 Laborversuche

**Prinzip**

Um eine Datenbasis für die Modellierung von Retention und Entwässerung im Labormaßstab zu erstellen, wurden Laborversuche mit dem DFR-04 (Kap. 0) durchgeführt. Die Versuche wurden auf die Randbedingungen der beiden untersuchten Papiermaschinen abgestimmt. Insbesondere wurden Faserstoff, Füllstoff, Additive und die Rezepturen von diesen Betrieben übernommen.

---

## 5.1 Material und Methoden

**Versuchsführung** Retention und Entwässerung wurden mit dem DFR-04 ermittelt. Für die Versuche wurde jeweils Dickstoff aus der Mischbütte eingesetzt. Zudem wurde Klarwasser des Scheibenfilters verwendet.

Variablen wurden einzeln nacheinander variiert. Während der Variation einer Einflussgröße blieben die anderen auf Referenzwerte eingestellt. Für PM B wurde Nanopartikel in separaten Versuchen sowohl zeitlich vor als auch nach einem letzten Scherenergieeintrag (Rühren) dosiert, analog einer Dosierung vor oder nach Maschinensortierer.

Die Korrelation zwischen Variablen und Zielgrößen wurde anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  beurteilt. Für Korrelationen mit einem Bestimmtheitsmaß über 0,5 wurde ein Signifikanztest (F-Test) durchgeführt.

### Variablen PM A

Variable	Minimum	Referenz	Maximum
Temperatur in °C	20	23	38
Stoffdichte in g/l	3,36	6	8,4
AKD (Dosiermenge) in %	0,12	0,23	0,46
PAC (Dosiermenge) in %	0	0,02	0,04
cPAM (Dosiermenge) in %	0,03	0,055	0,09
NP (Dosiermenge) in %	0,065	0,13	0,26

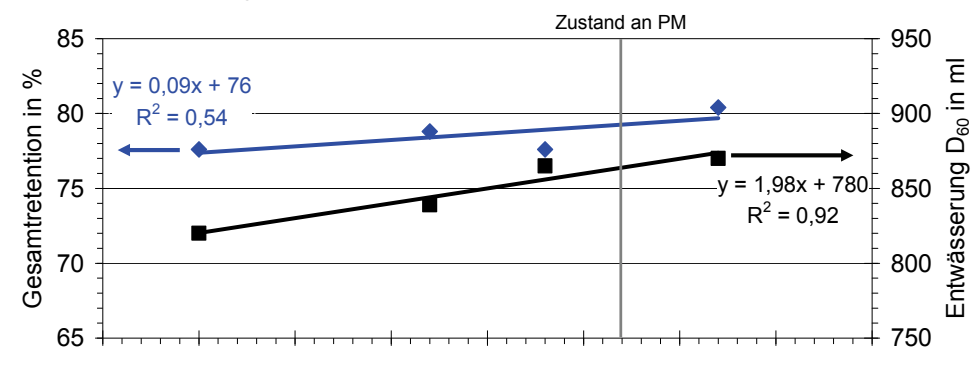
### Variablen PM B

Variable	Minimum	Referenz	Maximum
PAC (Dosiermenge) in %	0	0,2	0,3
Kat. Stärke (Dosiermenge) in %	0	0,17	0,68
NP (Dosiermenge) in %	0	0,85	1,7

## 5.2 Ergebnisse und Diskussion der Versuche zu PM A

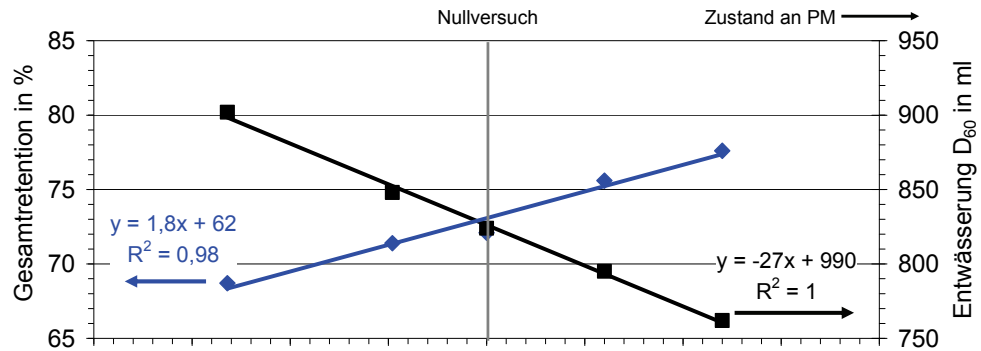
### Einfluss der Temperatur

Gesamtretention und Entwässerungsmenge steigen mit der Temperatur. Die steigende Entwässerungsmenge ist vorrangig durch die abnehmende Viskosität der Suspension begründet.



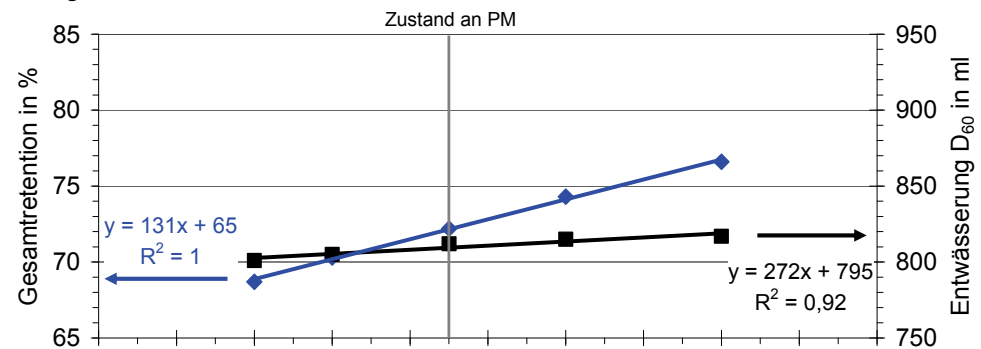
**Einfluss der Stoffdichte**

Die Retention steigt mit der Stoffdichte. Die Entwässerungsleistung fällt dagegen ab:



**Einfluss von Polyacrylamid**

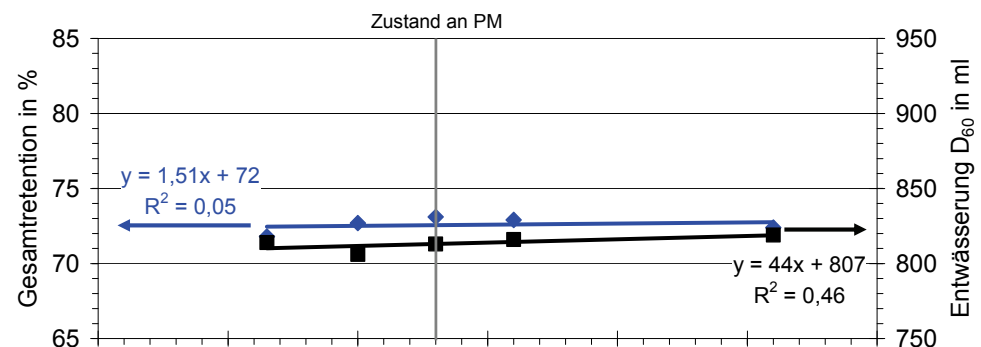
Ein starker Einfluss des als Retentionsmittel eingesetzten kationischen Polyacrylamids wurde beobachtet. Die Zielgrößen steigen signifikant mit der Dosiermenge an.



Durch die Erhöhung der Dosiermenge wird die Flockung verstärkt, mehr Füll- und Feinstoffe retendiert und die Entwässerung verbessert.

**Einfluss der Nanopartikel**

Zwischen der Nanopartikeldosierung und den Zielgrößen war kein signifikanter Zusammenhang zu beobachten:





**Einfluss von AKD und PAC**

Die Dosierungen von AKD-Leimungsmittel und von PAC hatten innerhalb des Variationsbereichs keinem signifikanten Einfluss auf die Zielgrößen.

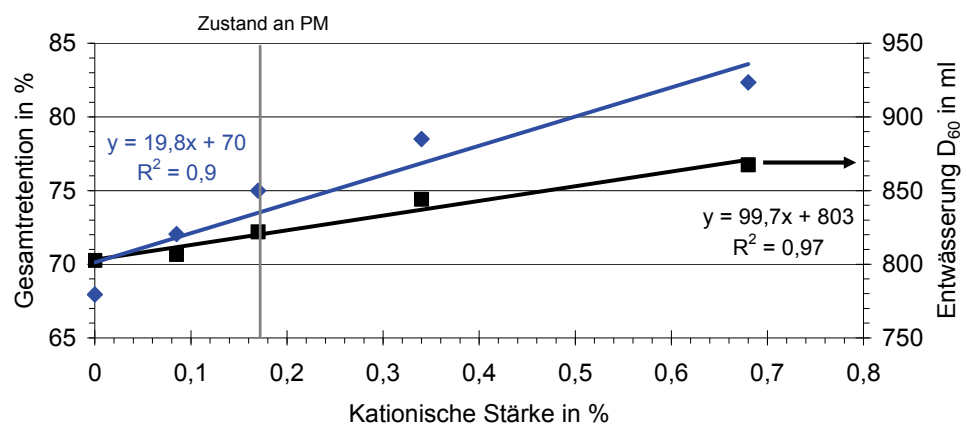
PAC wird als Fixiermittel eingesetzt. Die Störstoffbelastung des Stoffs war gering (kationischer Bedarf  $59 \mu\text{eq/l}$ ), weswegen PAC nur eine geringe Wirkung als Störstofffixierer ausübt. Die Dosiermenge wurde ausgehend von den Werten im Werk (0,02 %) variiert. Damit lagen die Dosiermengen im Versuch mit max. 0,04 % sehr niedrig. Bei höherer Störstoffbelastung wäre eine Wirkung des Fixiermittels auf die Retention zu erwarten, da Retention mindernde Nebenreaktionen des Retentionsmittels mit Störstoffen reduziert würden.

**Wet-End-Parameter**

Die Additvdosierungen korrelierten nicht signifikant mit pH-Wert, Leitfähigkeit, kolloidale Ladung und Faserladung. Die Einbeziehung dieser Wet-End-Parameter in die Modellierung erschien daher nicht zielführend.

**5.3 Ergebnisse und Diskussion der Versuche zu PM B****Einfluss der kationischen Stärke**

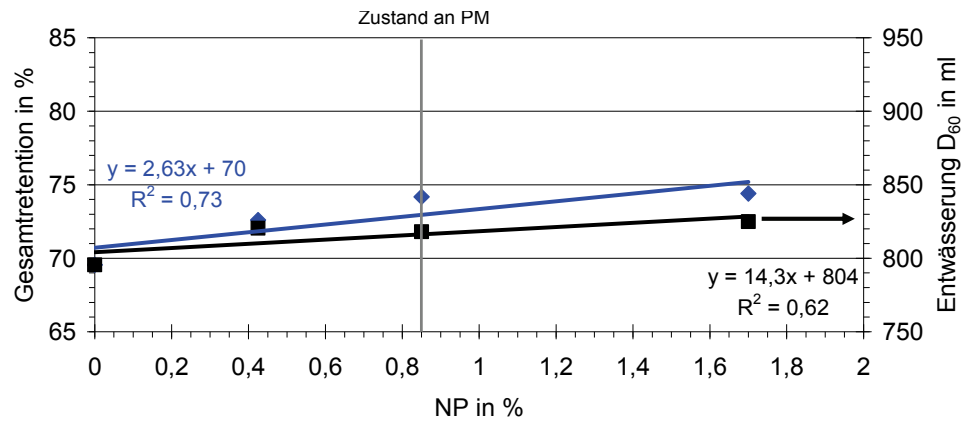
Beobachtet wurde ein deutlicher Einfluss der Dosierung an Retentionsstärke auf die Gesamtretenion:



Auch die Entwässerung wurde von der Stärkedosierung positiv beeinflusst. Als Ursache ist eine stärkere Flockung anzunehmen, die zu einem geringeren hydrodynamischen Widerstand der Suspension führt. In der Labormessung spielt das in den Flocken gebundene Wasser kaum eine Rolle. An Papiermaschinen, an denen auch das Flocken-gebundene Wasser entfernt werden soll, kann die Entwässerungsleistung durch hohe Dosierung verschlechtert werden [40].

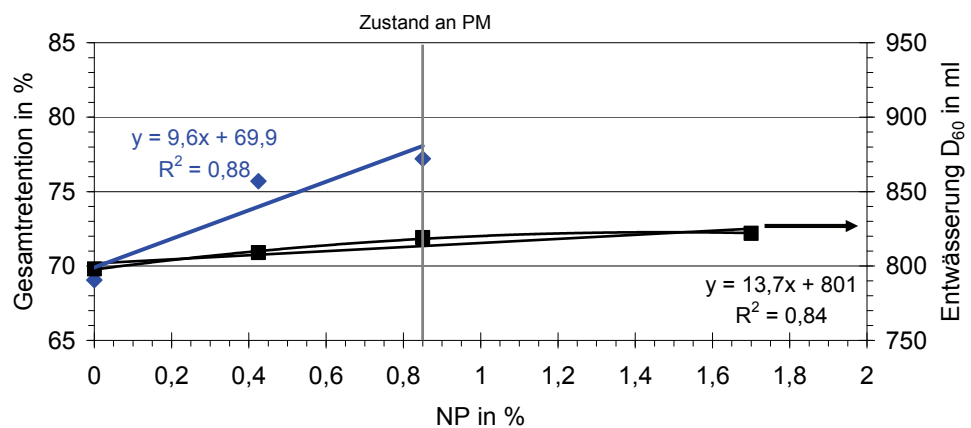
### Einfluss der Nanopartikeldosierung (analog Dosierung vor Vertikalsortierer)

Ein positiver Einfluss einer Nanopartikeldosierung vor Scherung auf die Zielgrößen war zu verzeichnen:



### Einfluss der Nanopartikeldosierung (Dosierung analog nach Vertikalsortierer)

Bei Dosierung nach Scherung war der Retentionsgewinn stärker:



Die durch Polyacrylamid und Nanopartikel gebildeten Flocken werden durch Scherung wieder zerstört. Die Flocken stehen dann einer Reflockulation nicht in vollem Umfang zur Verfügung.

**Einfluss des PAC** Die PAC-Dosierung zeigte keinen signifikanten Einfluss.

## 5.4 Modellierung der Laborversuche

### 5.4.1 Lineare Modellierung

**Modellbildung** Zur Auswertung der Laborversuche wurden für jede Einflussgröße paarweise Abhängigkeiten zu den Zielgrößen in Form des Regressionskoeffizienten berechnet, die dann zu einem Gesamtmodell zusammengestellt wurden.

**Korrelationsmaße für PM A**

Folgend sind Regressionskoeffizient  $b$  und Bestimmtheitsmaß  $R^2$  aufgeführt. Signifikante Korrelationen mit einem  $R^2$  über 0,5 stehen in Fettdruck.

PM A Parameter	Gesamtretention		Ascheretention		Entwässerung $D_{60}$	
	b	$R^2$	b	$R^2$	b	$R^2$
Temperatur in °C	0,09	<b>0,54</b>	0,23	0,53	1,98	<b>0,92</b>
Stoffdichte in g/l	1,8	<b>0,98</b>	6,5	<b>0,96</b>	-27	<b>1,00</b>
AKD in %	0,8	0,19	2,4	0,26	-18,5	0,5
PAC in %	10	0,11	27	0,12	300	0,18
cPAM in %	131	<b>1,00</b>	395	<b>1,00</b>	272	<b>0,92</b>
Nanopartikel in %	1,51	0,05	5	0,07	44	0,46
Achsenabschn. a	<b>58,3</b>		<b>-22,5</b>		<b>941</b>	

**Korrelationsmaße für PM B**

PM B Parameter	Gesamtretention		Ascheretention		Entwässerung $D_{60}$	
	b	$R^2$	b	$R^2$	b	$R^2$
PAC in %	1,4	0,26	4,3	0,26	-2	0,01
Kat. Stärke in %	19,8	<b>0,90</b>	65,9	<b>0,91</b>	99,7	<b>0,97</b>
NP in % vor Scherung	2,63	0,73	9,06	0,74	14,3	0,62
Achsenabschn. a	<b>56,8</b>		<b>-32,2</b>		<b>725</b>	

**Modellbildung, Beispiel**

Mit diesen Daten lassen sich Modelle 1. Ordnung für die Outputgrößen erstellen, entsprechen der allgemeinen linearen Regressionsgleichung:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2)$$

mit

$y$  Outputvariable,  $a$  Achsenabschnitt,  $b$  Regressionskoeffizienten,  $x$  Inputvariablen

Die Referenzversuche zu PM A ergaben für die Gesamtretention einen Mittelwert von 76,3 %; hieraus wurden die Achsenabschnitte  $a$  berechnet. Für das Modell der Gesamtretention  $G$  im Labormaßstab ergibt sich damit die Gleichung

$$G \text{ in \%} = 58,3 + 0,09 \cdot \text{Temperatur} + 1,8 \cdot \text{Stoffdichte} + 131 \cdot \text{cPAM} \quad (3)$$

Die Parameter für die Gleichungen der anderen Zielgrößen sind analog aus den Tabellen ablesbar.

**5.4.2 Nichtlineare Modellierung****Hintergrund**

Es darf erwartet werden, dass eine lineare Modellierung in gewissen Variationssschranken hinreichend genau ist. Grundsätzlich ist jedoch der nichtlineare Charakter der untersuchten Einflüsse zu betrachten.

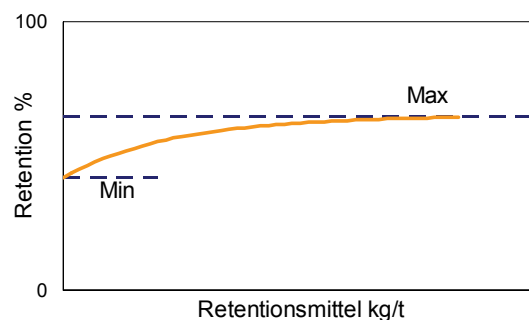
### Grundlagen der Abhängigkeitsfunktion

Für die Abhängigkeit der Retention von der Dosierung eines Retentionspolymers gilt:

- Auch ohne Retentionsmittel hat die Stoffsuspension durch mechanische Filtration am Sieb eine Mindestretention.
- Es bestehen keine Hinweise auf eine Schwelldosierung, ab der ein Retentionspolymer erst wirkt. Retentionsadditive wirken bereits bei geringer Dosierung.
- Ab einer gewissen Dosiermenge des Retentionspolymers lässt sich die Retention nicht weiter steigern. Stets lässt sich ein Teil der Feinpartikel nicht flocken und retendieren – ein Sättigungswert wird erreicht:
- Wird ein Retentionsmittel soweit überdosiert, dass der Faserstoff im Zetapotenzial umgeladen wird, nimmt die Flockung wieder ab, und damit auch die Retention. Solche Dosiermengen sind für Retentionspolymere jedoch nicht praxisrelevant [41].

### Kurvenfunktion

Diese Aspekte lassen in etwa folgenden Kurvenverlauf erwarten:



Eine solche Kurve lässt sich durch eine exponentielle Sättigungsfunktion beschreiben:

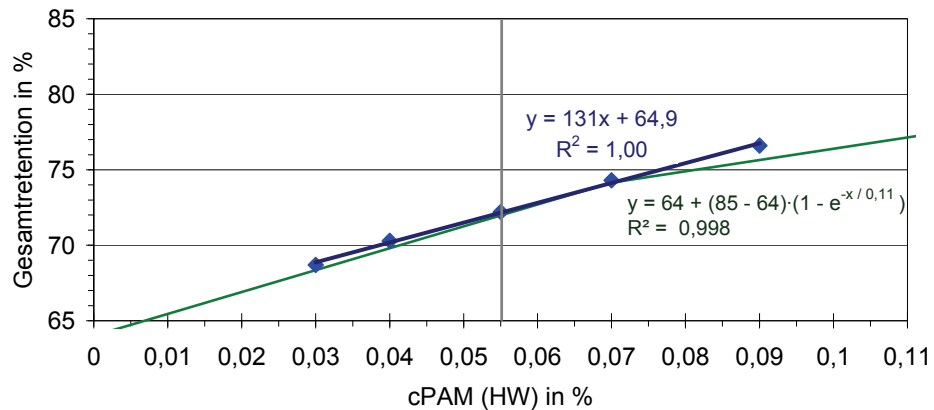
$$y = \text{min} + (\text{max} - \text{min})(1 - e^{-x/q}) \quad (4)$$

mit  $y$  Retention,  $x$  Dosiermenge,  $\text{min}$  Minimalwert der Retention,  $\text{max}$  Maximalwert der Retention,  $q$  Konstante.

Für eine genauere Spezifikation der Formel fehlen sowohl detaillierte mechanistische Erkenntnisse als auch hinreichend genaue Messmöglichkeiten. Die exponentielle Sättigungsfunktion liegt daher für die Abbildung eines breiten Einflussbereichs nahe [41].

**Kurvenanpassung, PM A**

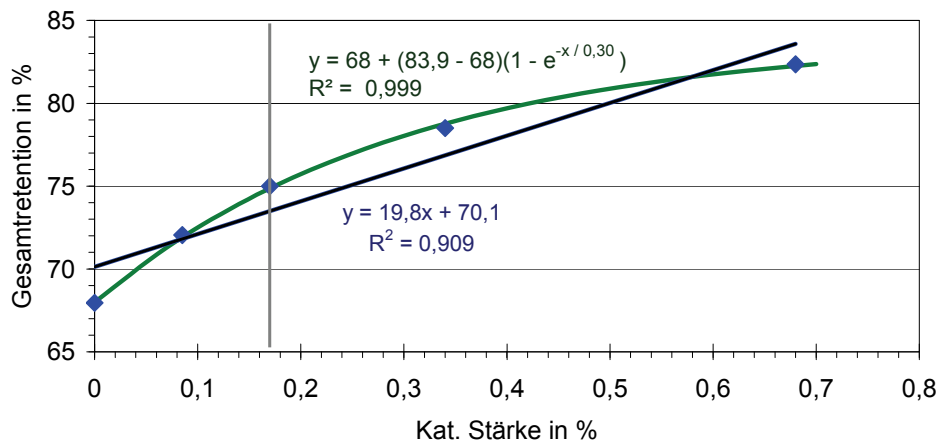
Die Funktion wurde für die Labordaten zum Einfluss von Polyacrylamid auf die Gesamtretention (PM A) angewendet. Die Kurvenanpassung erfolgte nach der Methode der kleinsten Quadrate. Für PM A wurden die minimale Retention zu 64 % und die maximale zu 85 % geschätzt. Damit ergab sich folgende Anpassung:



Die Versuchsdaten werden hier durch die lineare Modellierung geringfügig besser angenähert.

**Kurvenanpassung, PM B**

Für die entsprechende Kurve mit den Daten von PM B war der Minimalwert experimentell zu 68 % ermittelt worden. Die anderen Gleichungsparameter  $q$  und  $max$  wurden über die mathematische Kurvenanpassung bestimmt:

**Aussagen aus der Literatur**

Sättigungsverläufe wurden auch in anderen Untersuchungen gefunden [42], jedoch nicht immer modelliert. Eine exponentielle Sättigungsfunktion wurde von Yli-Fossi et al. für die Retentionsmodellierung verwendet [41]. Andere datenbasierte Modellierungen der Retention nutzten lineare [25] oder quadratische Modelle [20].

---

**Flockung und  
Formation**

Zu der Frage, ob Retentionsmittel nichtlinear auf die Formation wirken, lässt sich aus den vorliegenden Daten keine signifikante Aussage treffen. Auch aus publizierten Arbeiten sind keine eindeutigen Zusammenhänge ablesbar. Weiterhin ist die Frage, ob es einen Maximalwert gibt, wie im Falle der Retention, kaum zu beantworten; zumindest lässt sich solch ein Wert nicht theoretisch festlegen. Zum Teil erscheinen Retention und Formationsindex in linearem Zusammenhang [42, 43]. Zudem ist zu beachten, dass der Zusammenhang vom Berechnungsalgorithmus des Formationsindex abhängt. Dieser ist zumeist nicht zugänglich oder dokumentiert. Eine lineare Modellierung von Flockung und Formation als einfachste Methode ist daher gerechtfertigt.

---

**Schluss-  
folgerungen**

Aus den Betriebsdaten erlaubt die begrenzte Spannbreite der Retentionsmitteldosierungen zusammen mit der statistischen Streuung der Zielgrößen keine Parametrierung eines nichtlinearen Modells. Frühere Untersuchungen [35] zeigten im Gegenteil, dass eine nichtlineare Modellierung keinen Gütegewinn für das Modell erbrachte. Solange die Übertragung sich auf einen begrenzten Variationsbereich der Inputgrößen beschränkt, ist daher eine lineare Modellierung ausreichend zielführend.

---

## 6 Technikumsversuche mit Flockungssensor

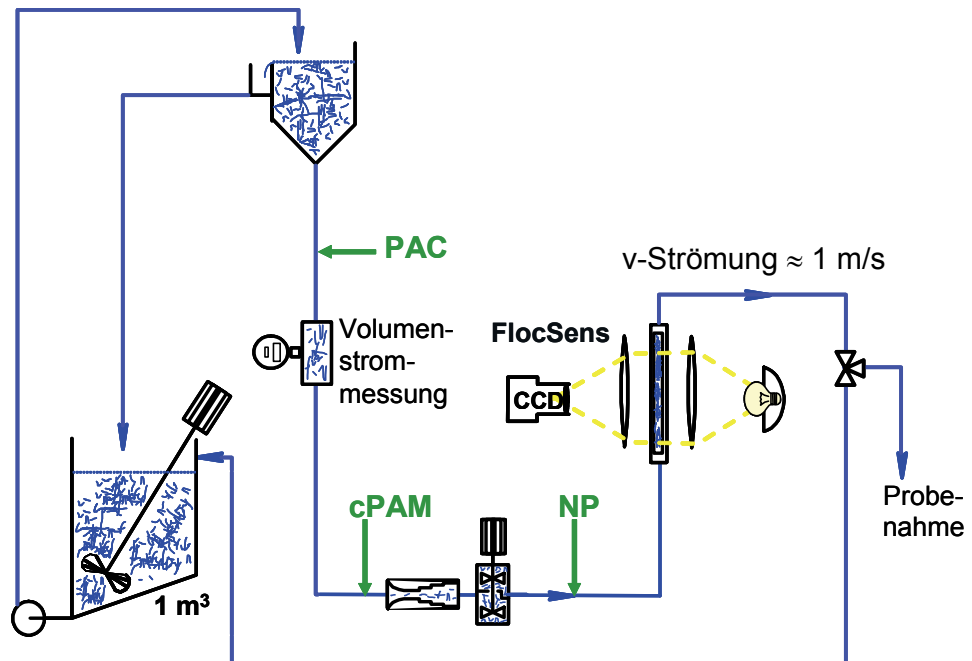
**Prinzip**

An einer Pilot-Dosierstrecke (CTP, Frankreich) wurden Versuche mit dem Stoff- und Additivsystem von PM A im Technikumsmaßstab durchgeführt. Retention, Entwässerung und Flockung wurden gemessen und modelliert.

---

### 6.1.1 Material und Methoden

**Versuchsaufbau** Folgendes Schema zeigt den Konstantteilsimulator. Die Flockung des Faserstoffs wurde online durch den Flockungssensor FlocSens erfasst (vgl. Kap. 4.2).



**Durchführung** Eingesetzt wurde das gleiche Stoff- und Additivsystem von PM A wie in den Laborversuchen.

Der Dickstoff wurde vorab mit Klarwasser verdünnt. 0,2 % AKD und 4 % GCC (bezogen auf otro Stoff) wurden dosiert. Der Füllstoffgehalt betrug 40 %. PAC, Polyacrylamid und Nanopartikel wurden online dosiert.

Vor und nach den Messzeiten wurde der Stoff ohne Additivzugabe kontinuierlich im Kreislauf geführt. Während der Messzeiten, bei Additivzugabe, wurde der Stoffstrom über das Probenahmeventil ausgeleitet und verworfen. Von diesem Stoffstrom wurden Proben zur Messungen von Retention, Entwässerung (beide mit DFR-04), Zetapotenzial und kolloidaler Ladung entnommen. Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit wurden kontinuierlich erfasst.

#### Variablen

Parameter	Minimum	Maximum
kationisches Polyacrylamid cPAM in %	0,01	0,1
Nanopartikel in %	0,066	0,2
Stoffdichte in g/l	8	10,8
Scherung in U/min	870	1480

Die Festlegung der Variationsbreite erfolgte auf der Grundlage der typischen Schwankungsbreite in der Papierfabrik. Da das Additivsystem anders als im Praxisprozess wirkte, wurde die Variationsbreite im Verlauf der Versuche erweitert. Die Versuchsdurchführung erfolgte anhand eines statistischen Versuchsplans.

## 6.1.2 Ergebnisse und Diskussion

### Temperaturkompensation

Die Temperatur wurde im Versuchsplan nicht aktiv variiert. Durch den Energieeintrag der Zirkulationspumpe stieg die Kreislauf Temperatur während der Versuchsdurchführung jedoch von 23 °C auf 40 °C. Der Temperatureinfluss wurde durch Wiederholungsversuche, die bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wurden, quantifiziert. Der  $D_{60}$ -Wert stieg mit der Temperatur. Mit einer Korrekturfunktion  $3,7/^\circ\text{C}$  wurden alle  $D_{60}$ -Werte auf 35 °C kompensiert. Retention und Flockung wurden nicht signifikant von der Temperatur beeinflusst.

### Korrelationsanalyse

Eine Korrelationsmatrix wurde erstellt. Nur die Korrelationen mit einem Signifikanzniveau ( $\alpha < 0,05$ ) sind dargestellt:

	cPAM	Nanopartikel	Stoffdichte	Scherung	Entwässerung $D_{60}$	Gesamtretention	Ascheretention	Flockenindex
cPAM	1,00							
Nanopartikel		1,00						
Stoffdichte			1,00					
Scherung				1,00				
Entwässerung $D_{60}$				-0,50	1,00			
Gesamtretention	0,47	0,34	-0,61		0,75	1,00		
Ascheretention	0,93			-0,31	0,43	0,52	1,00	
Flockenindex	0,88		0,32	-0,41	0,42	0,46	0,90	1,00

Die Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen werden im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Modellierung diskutiert. Die drei Zielgrößen Entwässerungsleistung, Retention und Flockung korrelierten positiv miteinander. Die Flockung beeinflusst Retention und Entwässerungsleistung.



**Modellierung**

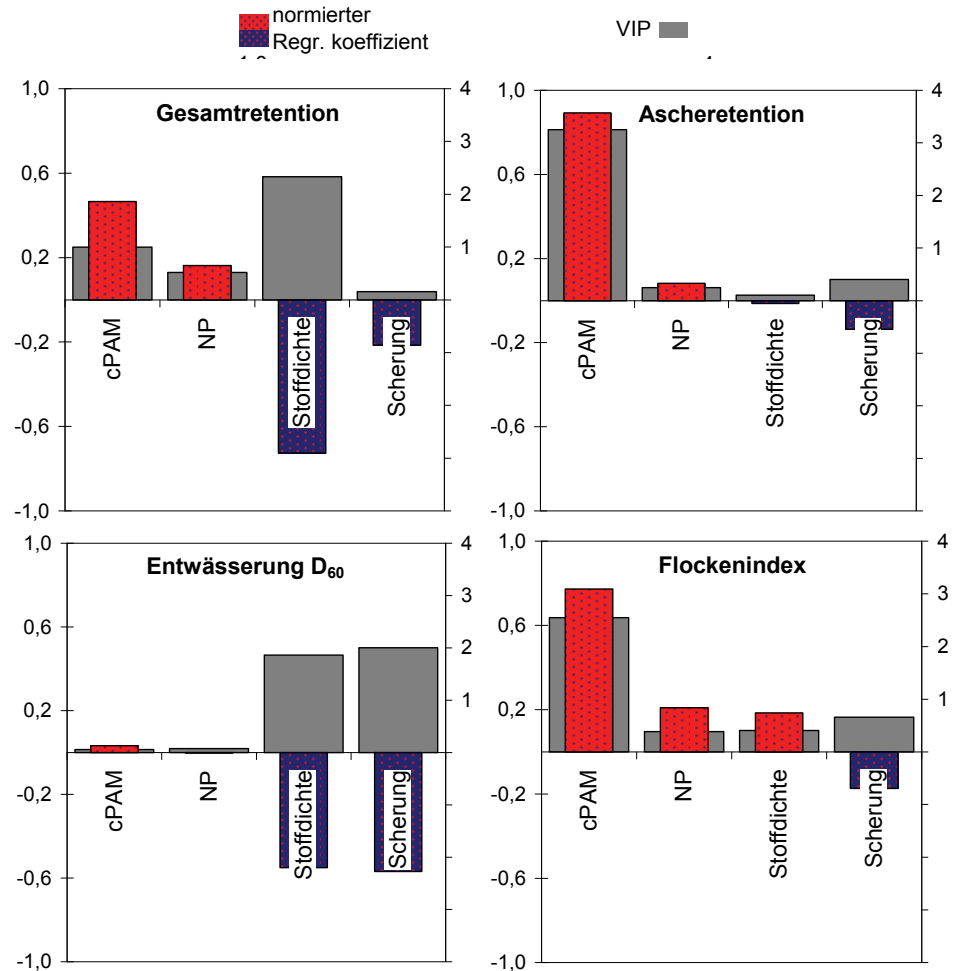
Zur Modellierung wurde die PLS-Methode verwendet. Basierend auf der Darstellung der Residuen wurden bis zu drei Ausreißer pro Modell entfernt. Folgende Modellgüten und Regressionskoeffizienten resultierten:

<b>PM A</b>	<b>Gesamt- retention</b>	<b>Asche- retention</b>	<b>Entwässerung D<sub>60</sub></b>	<b>Flockenindex</b>
RMSE	4,1	3,8	14	25,6
Mittelwert ± s	62,6 ± 8,9	5,8 ± 10,2	704 ± 21,2	226,6 ± 90,7
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,79</b>	<b>0,89</b>	<b>0,55</b>	<b>0,91</b>
Regressionskoeff. b				
cPAM in %	123	298	20	1.977
Nanopartikel in %	28,8	18,2	-0,62	363
Stoffdichte in g/l	-4,86	-0,12	-8,52	12,3
Scherung in U/min	-0,01	-0,01	-0,04	-0,06
Achsenabschnitt a	108,3	-3,6	832	13,7

Das Modell für die Entwässerung D<sub>60</sub> weist mit einem R<sup>2</sup> von 0,55 eine für kontrollierte Versuche niedrige Modellgüte auf. Für die Gesamtretention (0,79), die Ascheretention (0,89) und die Flockung (0,91) ist die Modellgüte gut bis ausgezeichnet.

### Normierte Regressionskoeffizienten und VIP

Die Diagramme zeigen die normierten Regressionskoeffizienten und die VIP-Werte der Einflussgrößen in den Modellen für Gesamt- und Ascheretention, Entwässerungsleistung und Flockenindex:



### Entwässerung (Mechanismen)

Der stark negative Einfluss der Stoffdichte auf die Entwässerungsmenge wird durch ein sich auf dem Sieb aufbauendes Faservlies hervorgerufen. Bei höheren Stoffdichten baut sich das Faserstoffvlies schneller und stärker auf, der Entwässerungswiderstand ist größer.

Der negative Einfluss der Scherung auf den D<sub>60</sub>-Wert kann wie folgt erklärt werden: Mit stärkerer Scherung verringert sich die Flockengröße, damit wird das Faservlies dichter, wodurch der Entwässerungswiderstand steigt. In der Versuchsanordnung wurde die Scherung bereits in der Versuchsanlage eingebracht, etwa 15 s vor dem Start der Entwässerungsmessung. Auch innerhalb dieses Zeitraums scheint keine Reflockulation erfolgt zu sein.

Der schwache Einfluss der Additive (Polyacrylamid und Nanopartikel) trifft nicht die bestehenden mechanistischen Vorstellungen. Angesichts der niedrigen Modellgüte mit  $R^2 = 0.55$  für den D<sub>60</sub>-Wert wird angenommen, dass die Reproduzierbarkeit der Entwässerungsmessung nicht ausreicht, um die Einflüsse auf die Entwässerung genau zu erfassen.

---

<b>Gesamtretention (Mechanismen)</b>	<p>Die Polyacrylamiddosierung zeigte erwartungsgemäß einen starken Einfluss auf die Retention. Das Retentionsmittel bindet Fein- und Füllstoffe und verhindert deren Siebdurchfall. Die Nanopartikeldosierung wirkte in der gleichen Richtung, jedoch schwächer.</p> <p>Die mit geringerer Stoffdichte einhergehende Retentionssteigerung trifft nicht die Erwartung. Um die Stoffdichte einzustellen, wurde Klarwasser der Papierfabrik eingesetzt. Es wird vermutet, dass im Klarwasser bereits enthaltene Additive die Retention positiv beeinflussten.</p> <p>Wie zu erwarten wirkt die Scherung der Flockung entgegen und hat einen negativen Einfluss auf die Retention.</p>
<b>Ascheretention (Mechanismen)</b>	<p>Im Modell für die Ascheretention tritt der Einfluss des Polyacrylamids am stärksten hervor. Im Gegensatz zum Modell für die Gesamtretention zeigte die Stoffdichte hier keinen signifikanten Einfluss.</p>
<b>Flockenindex (Mechanismen)</b>	<p>Mit steigender Retentionsmitteldosierung flockte die Stoffsuspension stärker. Die Nanopartikeldosierung wirkte analog, ist jedoch schwächer.</p> <p>Die Scherung wirkt der durch Polyacrylamid induzierten Flockung entgegen. Retention und Faserflockengröße verringern sich gleichzeitig. Die Effizienz des Nanopartikels (Dosierung nach Scherung) zur Reflockulation ist dabei begrenzt.</p> <p>Eine Erhöhung der Stoffdichte erhöht allgemein die Flockungsneigung und mittlere Flockengröße [21]. In den Versuchen zeigte die Stoffdichte nur einen geringeren Einfluss. Dies kann wiederum durch den gegenläufigen Effekt von Additiven im zur Verdünnung eingesetzten Klarwasser begründet sein. An Feinstoffen bereits adsorbiertes Polyacrylamid könnte im Siebwasserkreislauf der PM A zirkulieren. Das Polymer ändert mit der Zeit seine Konformation, indem es sich knäuel. Die reduzierten Kettenlängen limitieren den Effekt der Faserflockung. Dies kann erklären, wie in den Versuchen die Retention durch Verdünnung verbessert wurde, ohne dass es zu einer starken Flockung kommt.</p>

---

## 7 Versuche an einer Pilotanlage, Modellierung

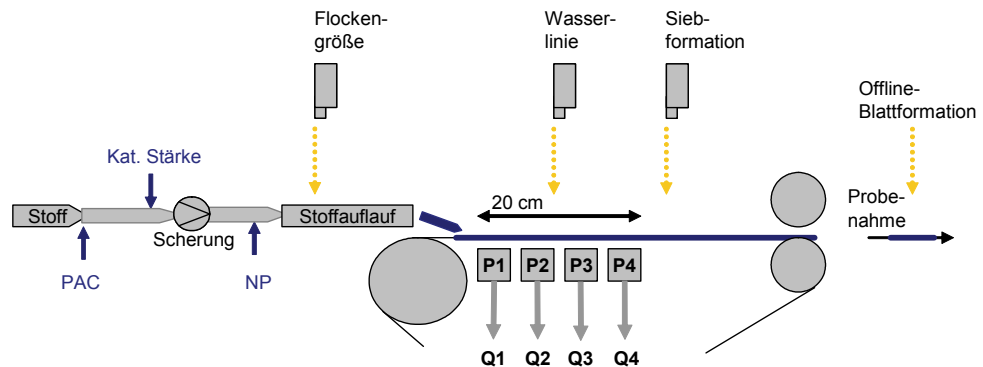
<b>Prinzip</b>	<p>An einer Pilotanlage (VTT, Finnland) wurde das Stoffsystem der PM B untersucht. Hier wurde mittels eines Kamerasystems die Flockung bildanalytisch im Stoffauflauf und auf dem Formationssieb bestimmt werden.</p>
----------------	---

---

### 7.1.1 Material und Methoden

#### Aufbau der Versuchsanlage

Die Pilotanlage besteht aus Stoffbevorratung, Konstantteil, Stoffauflauf und Siebpartie.



Die Stoffsuspension wird über vier Saugkästen entwässert, die mit Drucksensoren ausgestattet sind. Die produzierte Papierbahn mit ca. 20 % Trockengehalt wird mit dem ebenso aufgefangenen Siebwasser wieder aufgeschlagen und in den Prozess zurückgeführt.

#### Versuchsdurchführung

Das gleiche Stoff- und Additivsystem wie in den Laborversuchen zu PM B wurde eingesetzt.

Der Dickstoff wurde in eine Mischbütte überführt, die Stoffdichte mittels Klarwasser eingestellt, das Stoff-Wasser-Gemisch durchmischt und auf 45 °C temperiert. Vor dem eigentlichen Versuchsbeginn wurde jeweils die flächenbezogene Masse (Flächenmasse) ohne Additvdosierung eingestellt. Erst danach wurden Additive zudosiert.

Die Maschinengeschwindigkeit betrug 3 m/s.

Die Kreislaufführung von sowohl Wasser als auch Stoff war Voraussetzung dafür, die Versuche mit Stoff einer Papierfabrik logistisch handhaben zu können. Sie führt jedoch zu einer Aufkonzentrierung von Additiven im Laufe eines Versuchstages. Dieser Effekt schränkt die quantitative Aussagekraft ein.

#### Papierbahnbeobachtung

Zur Papiermusterentnahme wurden im laufenden Versuchsbetrieb etwa 15 x 15 cm große Probenahme-Kartone auf die Papierbahn am Siebende aufgebracht und nach einer Gautschwalze zusammen mit dem Papiermuster aufgefangen. Die Muster wurden anschließend zwischen Stahlplatten im Labor getrocknet.

#### Flockung/Siebformation

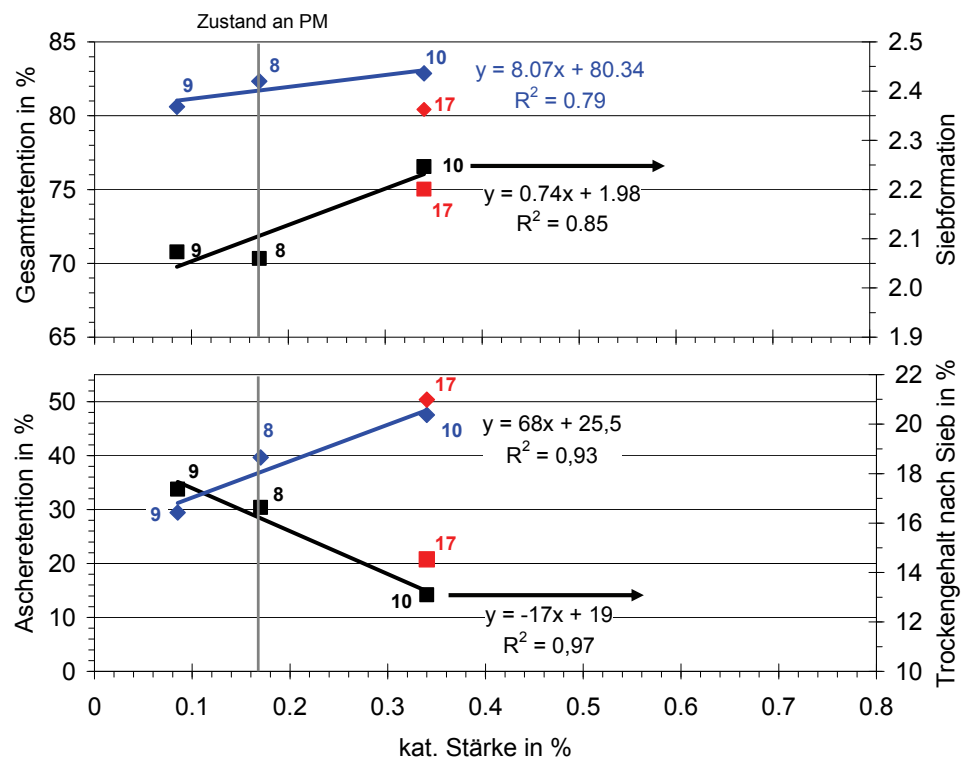
Die Messung der Flockengröße erfolgte im Durchlicht mit CCD-Kamera und optischer Bildanalyse. Die Formation auf dem Sieb wurde im Bereich hinter der Entwässerungszone gemessen. Bei dieser Messung wird das Siebmuster rechnerisch aus der Formationsauswertung entfernt.

**Versuchsplan**

Die Versuche wurden innerhalb von fünf Tagen durchgeführt. Die Einstellgrößen wurden einzeln ausgehend von der Referenzeinstellung variiert. In Nullversuchen wurde die flächenbezogene Masse eingestellt; diese wurden nicht ausgewertet.

**7.1.2 Ergebnisse und Diskussion****Einfluss der kationischen Stärke**

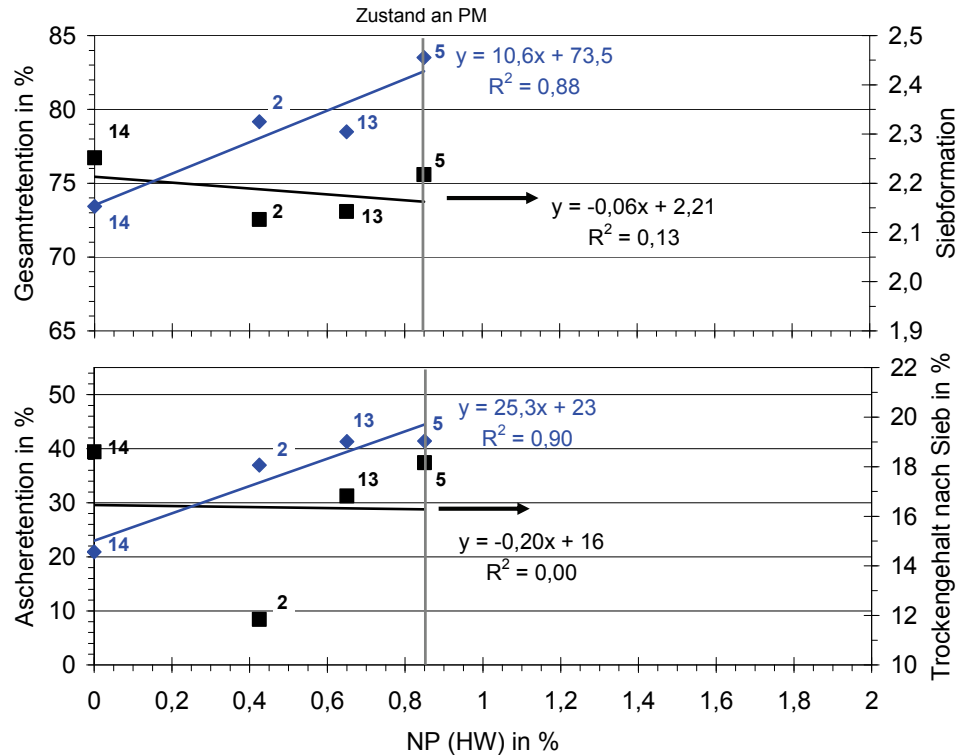
Folgende Diagramme zeigen den Einfluss der kationischen Stärke. Die Versuche 10 und 17 waren identisch, wurden jedoch an verschiedenen Versuchstagen mit anderem Stoffansatz durchgeführt:



Die Dosierung von kationischer Stärke erhöhte die Retentions- und die Formationswerte (größere Wolken). Die mit Stärkedosierung fallende Entwässerungsleistung kann nicht ohne weiteres erklärt werden. Anteilige Ursache kann eine steigende Viskosität der Suspension sein.

**Einfluss von Nanopartikel**

Die Nanopartikeldosierung steigerte die Retentionswerte. Die Siebformation wurde nicht signifikant beeinflusst. Der Trockengehalt nach Sieb lässt keine einheitliche Tendenz erkennen:



**Einfluss von PAC**

Wie in den Laborversuchen beeinflusste die PAC-Dosierung die Zielgrößen nicht signifikant.

**Modellierung**

Die Regressionskoeffizienten wurden aus den Versuchen unter Variation einer Einflussgröße ausgewertet. Signifikante Korrelationen mit einem Bestimmtheitsmaß größer 0,5 sind in Fettdruck gesetzt:

PM B	Gesamtretention		Ascheretion		TG nach Sieb		Siebformation	
	b	R <sup>2</sup>	b	R <sup>2</sup>	b	R <sup>2</sup>	b	R <sup>2</sup>
PAC in %	1,91	0,12	<b>-3,95</b>	<b>0,90</b>	0,81	0,01	0,12	0,19
kat. Stärke in %	<b>8,1</b>	<b>0,79</b>	<b>68</b>	<b>0,93</b>	<b>-17</b>	<b>0,97</b>	<b>0,74</b>	<b>0,85</b>
Nanopartikel in %	<b>10,6</b>	<b>0,88</b>	<b>25,3</b>	<b>0,90</b>	-0,20	0,00	-0,06	0,13
Achsenabschnitt	72,5		8,3		20,3		2,01	

## 8 Übertragung vom experimentellen auf den Betriebsmaßstab

### 8.1 Methodik

#### Skalierung der Regressionskoeffizienten

Einflüsse von Versuchs- oder Betriebseinstellungen auf die Zielparameter wurden in den vorigen Kapiteln durch mathematische Modelle innerhalb der einzelnen Skalierstufen beschrieben. Verwendet wurden Regressionsfunktionen nach Gleichung 2. Eine Skalierfunktion soll erlauben, aus Labor- oder Technikumsversuchen Betriebswerte zu prognostizieren.

Auf Basis eines linearen Betriebsdatenmodells

$$y_B = a_B + b_{B1}x_1 + \dots + b_{Bn}x_n \quad (5)$$

und des entsprechenden Labor-/Technikumsdatenmodells

$$y_L = a_L + b_{L1}x_1 + \dots + b_{Ln}x_n \quad (6)$$

mit

$y$  Outputvariable,  $a$  Achsenabschnitt,  $b$  Regressionskoeffizienten,  $x$  Inputvariablen; Suffix  $B$  Betriebsmaßstab, Suffix  $L$  experimenteller Maßstab

hat das skalierte Modell die Form

$$y_B = a_S + \dot{u}_1 b_{L1}x_1 + \dots + \dot{u}_n b_{Ln}x_n \quad (7)$$

mit

$\dot{u}$  Skalierfaktoren,  $a$  Achsenabschnitt des skalierten Modells.

Die Skalierfaktoren berechnen sich zu

$$\dot{u}_i = \frac{b_{Bi}}{b_{Li}} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (8)$$

Der lineare Modellierungsansatz erlaubt, für jeden Einflussparameter  $x$  die Einflussstärke (Steigung in den Abhängigkeitsdiagrammen; Empfindlichkeit) einzeln zu skalieren.

#### Skalierung des y-Achsenabschnitts

Es wird angenommen, dass das Verhältnis  $\dot{u}$  der Empfindlichkeiten zwischen experimentellem und Betriebsmaßstab unter noch zu diskutierenden Bedingungen verallgemeinerbar und die Empfindlichkeit im Betriebsmaßstab damit aus den Versuchen prognostizierbar ist. Das gilt nicht für den Achsenabschnitt  $a_S$ , der das Niveau der Zielgrößen prognostizierbar machen soll. Der experimentelle Aufbau weicht von der Papiermaschine ab, so dass das Niveau der Zielgrößen nicht übereinstimmt. Dies in unterschiedlichem Maße für verschiedene Maschinenkonfigurationen anzunehmen. Stützende Messwerte der Papiermaschine sind für die Übertragung notwendig.

**Skalierung des y-Achsenabschnitts über Stützwerte**

Als Stützwerte sind die mittlere Retention oder Formation für die Papiermaschine bekannt. Sie dienen als Ausgangspunkt für die Übertragung. Die Mittelwerte der Inputgrößen sind ebenfalls bekannt. Die Regressionsgleichung lässt sich so umformen, dass diese Werte direkt einsetzbar sind.

$$y_B = \bar{y}_B + \hat{u}_1 b_{L1} (x_1 - \bar{x}_1) + \dots + \hat{u}_n b_{Ln} (x_n - \bar{x}_n) \quad (9)$$

mit

$\bar{y}_B, \bar{x}$  Mittelwerte der Zielgröße und der Einstellgrößen im Betriebsmaßstab

Der im Labordatenmodell ermittelte Achsenabschnitt wird also nicht verwendet. Die Abweichung des Niveaus (Mittelwerts) der Zielgrößen zwischen Labor und Betrieb ist jedoch zu diskutieren.

**8.2 Übertragung PM A****Übertragbarkeit**

Für PM A wurden in den verschiedenen Skalierstufen als wesentliche Größen variiert und gemessen:

	Labor A	Technikum A	PM A
<b>Varierte Größen</b>			
Scherung	nicht variiert	x	nicht unabh. variiert
Temperatur	x	kompensiert	nicht unabh. variiert
Stoffdichte	x	x	nicht unabh. variiert
AKD	x	konstant	nicht unabh. variiert
PAC	x	x	nicht unabh. variiert
cPAM	x	x	x
Nanopartikel	x	x	nicht auswertbar
<b>Gemessene Größen</b>			
Gesamtretention	x	x	x
Ascheretention	x	x	x
Flockenindex		x	x
Entwässerungsleistg.	x	x	keine Messung
Formation	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	x

x = variiert bzw. gemessen

An der Papiermaschine ließen sich einzelne Einflussgrößen nicht unabhängig voneinander variieren oder wurden nicht variiert. Die Dosierung von Polyacrylamid lässt sich für die Übertragung in den Betriebsmaßstab auswerten.

Gesamt- und Ascheretention wurden in allen drei Skalierstufen gemessen. Für die Formation erfolgt die Übertragung indirekt über die Flockungsmessung.



### 8.2.1 Retention

#### Übersicht der Regressionskoeffizienten

Folgende Tabelle zeigt die Regressionskoeffizienten  $b$  auf der Basis der in den Skalierstufen erstellten Modelle sowie die nach Gleichung 8 berechneten Skalierfaktoren:

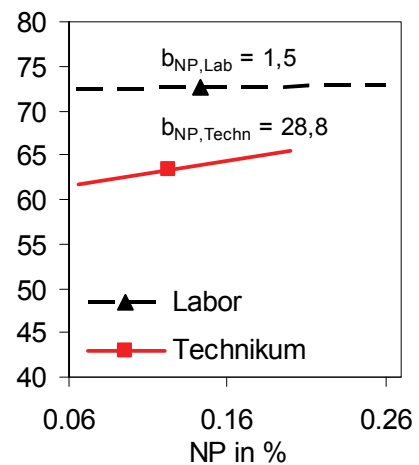
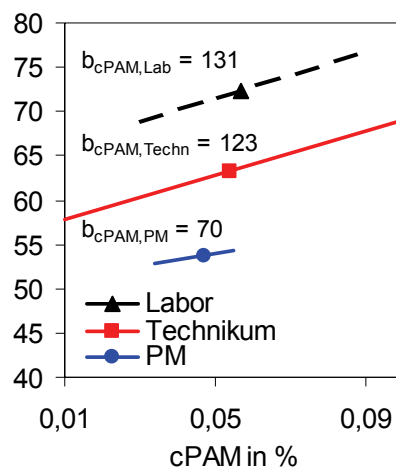
PM A/Retention	Regressionskoeffizienten $b$			Skalierfaktoren $\ddot{u}$	
	Labor	Techn.	PM A	Labor $\rightarrow$ PM	Techn. $\rightarrow$ PM
Scherung in U/min		-0,01			
Temperatur in °C	0,09	0			
Stoffdichte in %	1,8	-4,86			
AKD in %	0				
PAC in %	0	0			
cPAM in %	131	123	70	0,53	0,57
Nanopartikel in %	1,5	28,8			
Füllstoff in t/t			0,071		
Mahlleistung KF in kW			0,0084		
Maschinengeschw. in m/min			-0,028		

#### Vergleich der Einflusstärke

Der Einfluss auf die Gesamtretenion lässt sich dem Variationsbereich der Einflussgrößen in den drei Skalierstufen Labor, Technikum und Papiermaschine zuordnen. Damit können die Empfindlichkeiten verglichen sowie die in der Praxis mögliche Spannbreite des Einfluss bewertet werden.

Die Anstiege  $b$  beschreiben die Änderung der Gesamtretenion bezogen auf die Änderung der Additivdosierung. Die dargestellten Variationsbreiten entsprechen in den Labor- und Technikumsversuchen dem Einstellbereich, an der Papiermaschine dem im Untersuchungszeitraum nach Datenaufbereitung vorliegenden Schwankungsbereich. Die Mittelwerte sind die mittleren gemessenen Gesamtretenionen in den einzelnen Skalierstufen.

Gesamtretenion in %



---

**Unterschiede zwischen Labormessung und Papiermaschine**

Die Empfindlichkeit der Retention gegenüber dem Retentionspolymer kationisches Polyacrylamid war im Labor mit 131 (% Retention pro % Dosierung) und im Technikum mit 123 fast gleich. An der Papiermaschine lag der Wert niedriger (70 % Retention pro % Dosierung). Die Polyacrylamiddosierung wirkt auf die Retention an der PM schwächer als im Labor und Technikum.

Die abweichenden Empfindlichkeiten sind vor allem auf zwei grundlegende Unterschiede zwischen einer Papiermaschine und dem in Labor und Technikum eingesetzten DFR-04 zurückzuführen.

Zum ersten wird im Retentionsmodus des DFR-04 kein Filterkuchen (Faservlies) gebildet. Die mechanische Rückhaltung im Faservlies, die auf der Papiermaschine zur Siebretention beiträgt, wird in der Labormessung durch Rühren unterdrückt. Fokussiert wird auf die so genannte chemische Retention, die auf der Agglomeration von Feinpartikeln oder deren Anlagerung an die Fasern beruht. Die mechanische Retention an der Papiermaschine nivelliert den Effekt, der durch Retentionsadditive erzielbar ist.

Zum zweiten unterscheiden sich die zu retendierenden Stoffsuspensionen im Labor und an der PM: Durch die Siebwasser-Rückführung enthält der Stoffauflauf der PM einen erheblichen Anteil an Feinpartikeln, die bereits ein- oder mehrfach nicht retendiert wurden. Diese lassen sich gegenüber neuem Stoff weitaus schlechter bei der nächsten Siebpassage retendieren. Die Retentionsadditive wirken nur auf den Anteil an neuem Stoff in der Stoffsuspension. Gleichzeitig ist ihre Dosierung nur auf diesen bezogen. In der Labormessung ist dagegen keine Rezirkulation realisiert, es wird nur "neuer" Stoff eingesetzt.

Diese Phänomene machen die Labormessung am DFR-04 gegenüber Additivdosierungen in etwa um den Faktor zwei empfindlicher als an der Papiermaschine. Dieser Unterschied ist zumeist erwünscht, um eine stärkere Differenzierung im Laborversuch zu erzielen.

Die höhere Empfindlichkeit der Labormessung erklärt auch, warum die Wirkung von Nanopartikel auf die Retention im Labor signifikant nachweisbar war, jedoch nicht an der Papiermaschine.

---

**Retentionsniveau**

Der höhere Anteil an feinpartikulärem, teilweise schon inertem Stoff im PM-Stoffauflauf erklärt ebenso das niedrigere Retentionsniveau im Betriebsmaßstab. Der niedrigere Wert kann – so muss gefolgert werden – durch die mechanische (Kuchen-) Filtration der Siebpartie nicht mehr ausgeglichen werden.

Der Retentionseffekt der mechanischen Filtration wird auch durch die flächenbezogene Masse bestimmt. Aufgrund von Kollinearitäten konnte die Empfindlichkeit der Retention gegenüber der flächenbezogenen Masse aus den Betriebsdaten nicht separiert werden.

---

**Folgerungen für die Verallgemeinerbarkeit**

Dies schränkt die Verallgemeinerbarkeit der Übertragungen für die Retention ein. Neben der flächenbezogenen Masse weichen noch andere Randbedingungen zwischen experimentellem und Betriebsmaßstab voneinander ab, zum Beispiel der Siebtyp. Zur Zusammenfassung verschiedener abweichender Randbedingungen wird als Arbeitshypothese aufgestellt: Die aufgestellten Skalierfunktionen gelten für die Retentionsniveaus, für die sie erstellt wurden. Für abweichende Niveaus sind weitere Untersuchungen notwendig.

**Skalierfunktion für die Gesamtretention**

Aus Gleichung 9 ergeben sich in expliziter Form die skalierten Modelle vom DFR-04 (Labor /Technikum) zu einer anderen Papiermaschine mit gleichem Typ des Retentionssystems, ähnlichem Retentionsniveau und vergleichbarer Anlagentechnik für die Gesamtretention  $G$  wie folgt:

$$G_{PM} = \overline{G_{PM}} + 0,55 \cdot b_{cPAM,L} (c_{cPAM} - \overline{c_{cPAM}}) \quad (10)$$

mit  $c$  spezifische Dosiermenge an der PM, Suffix PM Papiermaschine, L Labor oder Technikum

**8.2.2 Flockenindex****Übersicht Regressionskoeffizienten**

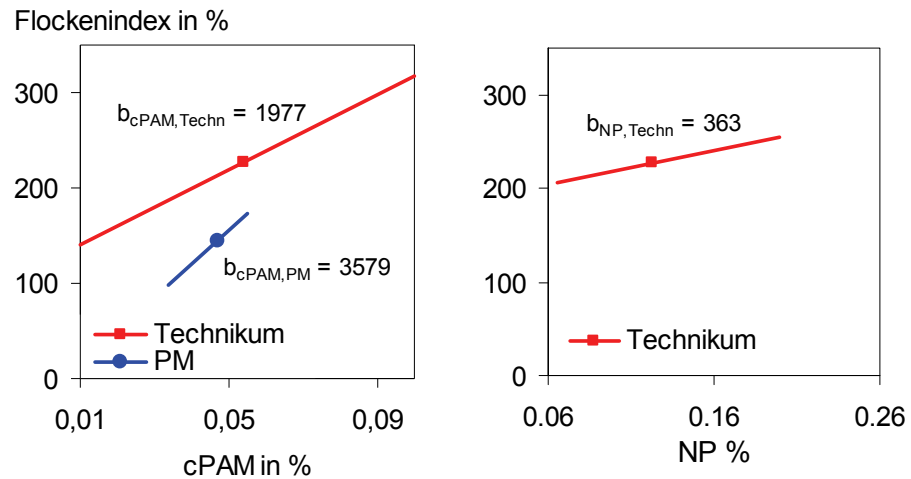
Die folgende Tabelle zeigt die Regressionskoeffizienten der im Technikum und an der Papiermaschine erstellten Modelle für den Flockenindex sowie die nach Gleichung 8 berechneten Skalierfaktoren. Fett gesetzt sind wiederum signifikante Korrelationen:

PM A/Flockenindex	Regressionskoeffizienten b		Skalierfaktor ü
	Technikum	PM A	Techn. →PM
Skalierstufe			
Stoffdichte in g/l	12,3		
cPAM in %	<b>1.977</b>	<b>3.579</b>	<b>1,8</b>
Nanopartikel in %	363		
LF in t/t		296	
HS in t/t		-1,17	
Füllstoff t/t		0,89	
Mahlleistung KF in KW		0,026	
Volumenstrom Stoffauf- lauf in l/min		-0,007	
Scherung in U/min	-0,06		

Auch hier sind die Effekte der Polyacrylamiddosierung vom Labor- und Technikumsmaßstab in den Betriebsmaßstab übertragbar.

**Vergleich der Einflussstärke**

Folgende Abbildungen zeigen den Einfluss der Polyacrylamiddosierung und der Nanopartikeldosierung auf den Flockenindex:

**Unterschiede**

In Vorversuchen wurde der Flockenindex durch Anpassung der Scherung auf einen an der Papiermaschine vergleichbaren Flockenindex eingestellt. Da der Versuchsplan jedoch während der Versuchsdurchführung angepasst werden musste (Erhöhung der Dosiermengen), liegt der mittlere Flockenindex in den Technikumsversuchen höher als an der Papiermaschine.

Der Einfluss der Polyacrylamiddosierung auf die Flockung war an der PM stärker als im Technikum. Als Ursache sind die unterschiedlichen Scherbedingungen im Technikum und an der Papiermaschine anzunehmen. Darüber hinaus werden die Additive an der untersuchten Papiermaschine mittels eines Hoch-turbulenz-Injektionsverfahrens eingebracht. Die starke Flockung überträgt sich an der PM nicht auf die Retention, wie vorab dargestellt. Die Turbulenzen in Stoffauflauf und Sieb scheinen die Flocken wieder aufzubrechen.

**Skalierfunktion für den Flockenindex**

Die Skalierfunktion für den Flockenindex FI vom Technikum zu einer Papiermaschine resultiert aus den Ergebnissen wie folgt:

$$FI_{PM} = \overline{FI_{PM}} + 1,8 \cdot b_{cPAM, Techn} \cdot (c_{cPAM} - \overline{c_{cPAM}}) \quad (11)$$

### 8.3 Übertragung PM B

#### Übersicht der Parameter

Folgende Größen wurden für PM B in den Skalierstufen variiert und gemessen:

Varierte Größen	Labor B	Pilot B	PM B
	Scherung	konstant	konstant
Temperatur	nicht unabh. variiert	konstant	nicht unabh. variiert
Stoffdichte	konstant	konstant	nicht unabh. variiert
PAC	x	x	nicht variiert
Kat. Stärke	x	x	x
Nanopartikel	x	x	x
<b>Gemessene Größen</b>			
Gesamtretenion	x	x	x
Ascheretenion	x	x	keine Messung
Flockung	im SW	x	keine Messung
Entwässerungsleistung	x	TG nach Sieb	keine Messung
Formation	nicht bestimmt	x	x

#### 8.3.1 Retention

#### Übersicht der Regressionskoeffizienten

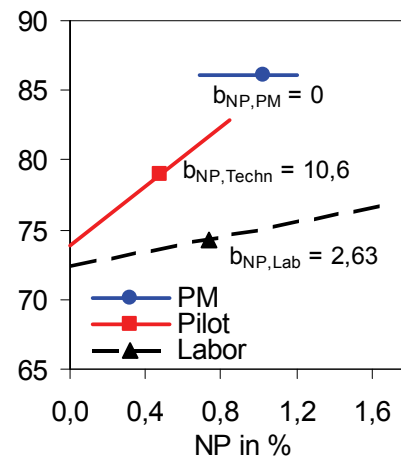
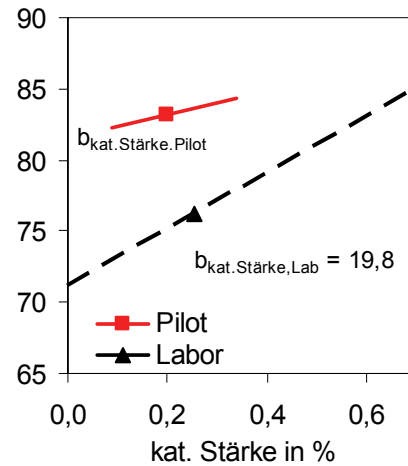
PM B/Retention Skalierstufe	Regressionskoeffizienten b			Skalierfaktoren ü	
	Labor	Pilot	PM B	Labor →PM	Pilot →PM
PAC in %	1,4	0			
Kat. Stärke in %	19,8	8,1			
Nanopartikel in %	2,63	10,6	0	0	0
Lippenöffnung in mm			1,2		

Für den Einfluss von kationischer Stärke auf die Gesamtretenion ist eine Übertragung auf den Betriebsmaßstab nicht möglich.

### Vergleich der Einflussstärke

Der Einfluss der Dosiermenge an kationischer Stärke sowie Nanopartikel auf die Gesamtretention lässt sich wie folgt visualisieren:

Gesamtretention in %



### Unterschiede

Der nicht eindeutige Einfluss von im Konstantteil dosierter kationischer Stärke (vgl. Kap. 4.3) und der nicht nachweisbare Einfluss von Nanopartikel sind darauf zurückzuführen, dass an PM B Papiere mit hoher flächenbezogener Masse produziert werden, wodurch die Gesamtretention unabhängig von der Retentionsmitteldosierung auf hohem Niveau liegt. Die Betriebsdatenmodellierung erlaubte hier keine Aussage über den anzunehmenden leichten Anstieg mit Dosiersteigerung. Im Labor und an der Pilotanlage war das Retentionsniveau geringer; die Retentionsmittelwirkungen waren nachweisbar.

### 8.3.2 Formation

#### Übersicht Regressionskoeffizienten

Folgend sind die Regressionskoeffizienten für die Siebformation an der Pilotanlage und für die Formationsparameter (Fwi und Fa) an der PM B aufgeführt:

PM B/Formation	Regressionskoeffizienten b		
	Pilotanlage	PM B	
Messgröße	Siebformation	Fa (Kontrast)	Fwi (Wolkigkeit)
Kat. Stärke (ZS) in %		0,091	-0,22
Kat. Stärke in %	<b>0,74</b>		
Nanopartikel in %	<b>0</b>	<b>-0,58</b>	<b>-0,31</b>
PAC in %	0		
Ungestrichener Ausschuss in %		0,053	0,055
Lippenöffnung in mm		-0,56	-0,052

Die Siebformation an der Pilotmaschine gibt die Wolkengröße wieder. Sie ist daher mit Fwi zu vergleichen. Allerdings konnte nur die Einflussstärke der Nanopartikeldosierung in beiden Maßstäben eindeutig bestimmt werden. Dabei zeigte das Nanopartikel keinen Einfluss an der Pilotanlage, jedoch an PM B.

Insbesondere nicht bestimmt werden konnte der Einfluss der Stärke im Zellstoffstrang im Labor- und Technikum, da die Stoffprobe im Betrieb nach dieser Stärkedosierung entnommen wurde.

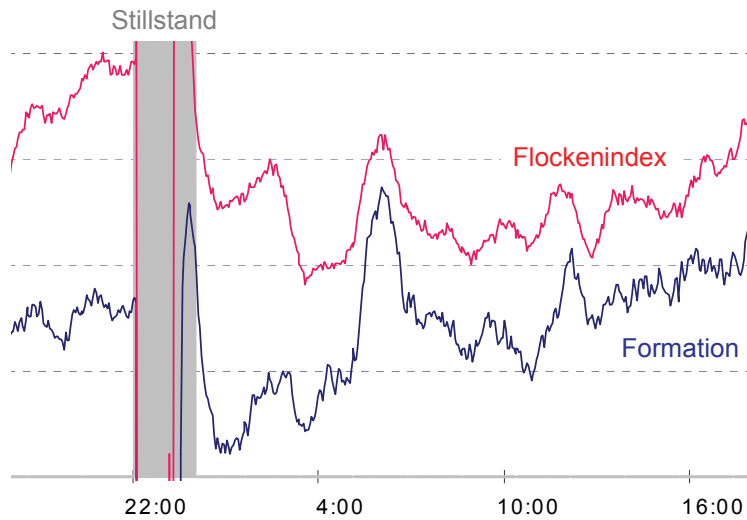
## 9 Übertragbarkeit der Flockungsbewertung auf die Formation

#### Prinzip

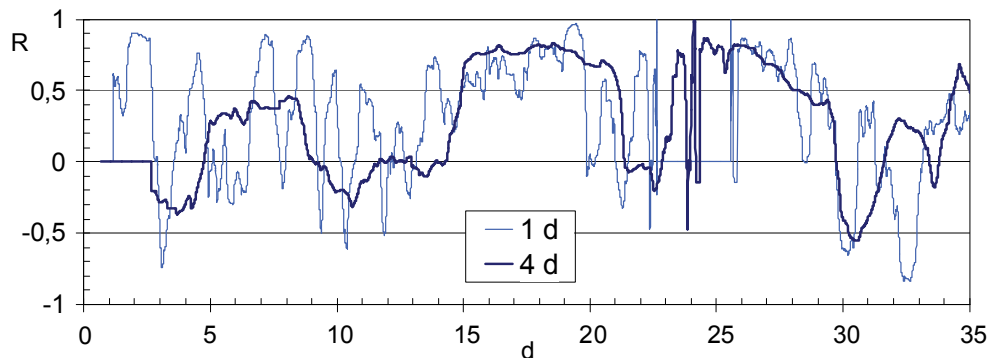
Die erwartete Korrelation zwischen Flockung und Formation wurde anhand der Onlinedaten von PM A geprüft.

**Trend**

Die Abbildung zeigt einen typischen Zeittrend (Ausschnitt) für den Flockenindex und die Formation:

**Korrelationskoeffizient**

Der Korrelation für den abgebildeten Zeitraum war signifikant ( $R^2=0,65$ ), aber während anderer Zeitbereiche gering. Dies muss auf andere Störgrößen zurückgeführt werden. Um die Einflüsse herauszuarbeiten, wurde ein gleitender Korrelationskoeffizient  $R$  mit 1 d und mit 4 d gleitender Periode über den gesamten Zeitbereich berechnet:



Die Formation korrelierte in einigen Zeitbereichen gut mit dem Flockenindex. In anderen Zeitbereichen war die Korrelation zwischen Flockung und Formation schwächer, bis hin zu negativer Korrelation. Es ist anzunehmen, dass in diesen Zeitbereichen die Maschineneinstellungen (Stoffauflauf und Vakuumsystem) eine dominierende Rolle für die Blattformation spielten.

Es darf davon ausgegangen werden, dass bei konstanter Einstellung der Maschinenparameter eine Übertragung der Faserflockung auf die Blattformation möglich ist.



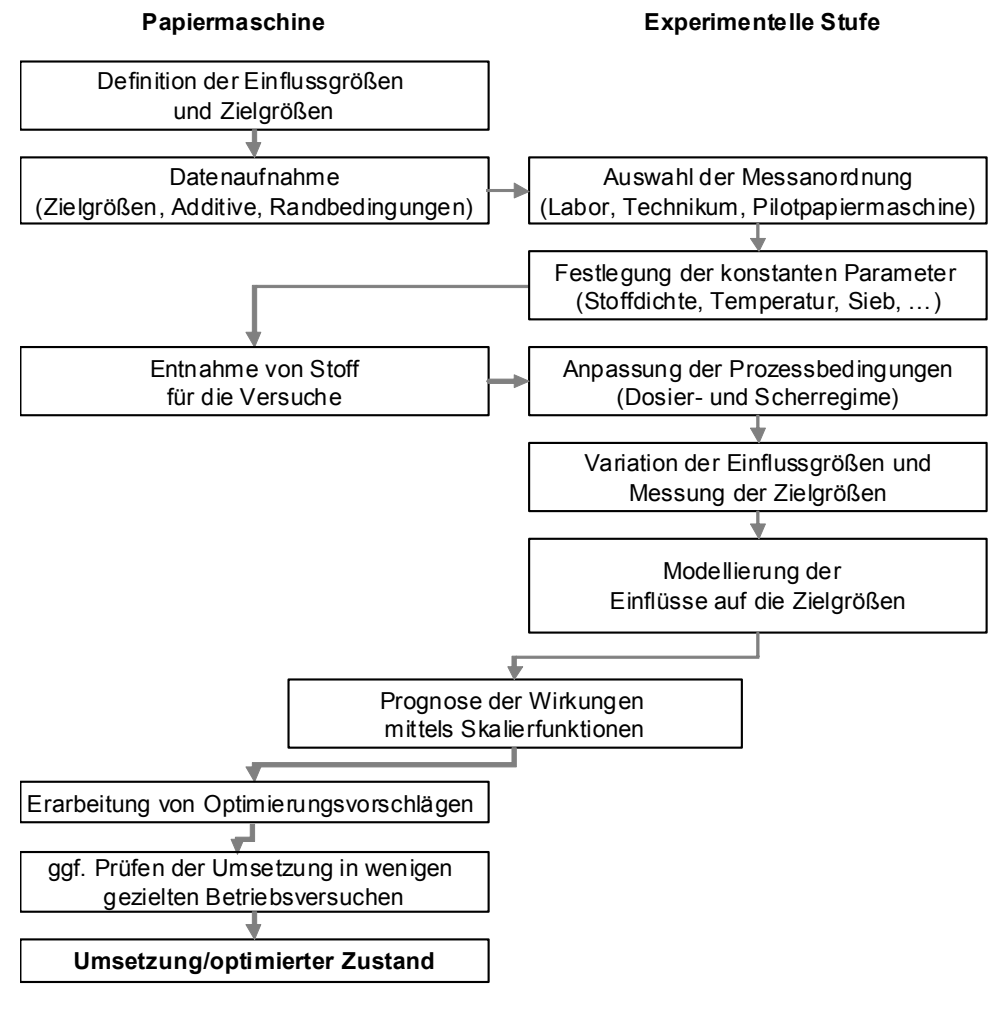
## 10 Schlussfolgerungen

### 10.1 Kriterien eines effizienten Vorgehens

<b>Betriebsdatenbasis</b>	Eine Aufnahme von Onlinedaten ohne Beobachtung des Produktionsprozesses, etwa als retrospektive Auswertung, ist mit Vorsicht anzugehen. Nur durch begleitende Beobachtung können instationäre Zustände und nicht dokumentierte Änderungen der Maschineneinstellungen erkannt werden und der nachstehenden Auswertung zur Verfügung stehen.
<b>Modellbildung aus Betriebsdaten</b>	Um Einflussstärken (Regressionskoeffizienten) korrekt zu ermitteln, bedarf es einer Variablenselektion aus a-priori-Wissen und der Durchführung von Betriebsversuchen zur gezielten Variation der Einflussvariablen.
<b>Laborversuche: Entwässerungsmessung</b>	Die im Labor verwendete Methode der Entwässerungsmessung erwies sich als begrenzt aussagefähig (reproduzierbar) zur Beschreibung schwacher Zusammenhänge. Die Entwicklung präziser und dennoch praxisnaher Laborverfahren zur Entwässerungsmessung ist wünschenswert. Ob Neuentwicklungen (z. B. [44]) hier eine Verbesserung bringen, ist zu prüfen. Ein objektiver Leistungsvergleich der vielen verfügbaren Messgeräte und -aufbauten (vgl. [27]) steht aus.
<b>Lineare Modellierung</b>	Für eine Optimierung von bestehenden Additivsystemen nahe dem aktuellen Arbeitspunkt ist eine lineare Modellierung ausreichend. Bei der Betriebsdatenmodellierung erbrachte eine nichtlineare Modellierung keine Vorteile für die Modellgüte [35]. Ist ein weiterer Variationsbereich der Additivdosierung abzudecken, ist zumindest für die Retention durch nicht-lineare Modellierung eine bessere Prognosegüte zu erwarten. In Kap. 5.4.2 wurden hierzu Grundlagen dargelegt.

## 10.2 Vorgehensweise zur Übertragung

**Vorgehensweise** Als Fazit der Forschungsarbeiten gibt folgendes Schema das Vorgehen wieder, mit dem anhand erarbeiteter Skalierfunktionen Betriebsversuche durch Labor-, Technikums- oder Pilotversuche ersetzt werden können.



### 10.3 Schlussfolgerungen, Nutzung der Ergebnisse

#### Übertragbarkeit

Die Wirkung des Retentionspolymers Polyacrylamid auf die Gesamtretenion war in allen Skalierstufen signifikant auswertbar und interpretierbar. Eine Übertragung vom experimentellen Maßstab auf die Papiermaschine über Skalierfunktionen ist machbar. Für die Skalierfunktionen ist das an der Papiermaschine vorliegende und maßgeblich durch die flächenbezogene Masse bestimmte Niveau der Gesamtretenion zu beachten.

Nicht im Betriebsmaßstab signifikant und damit auch als Skalierfunktionen fassbar waren schwache Wirkungen, wie etwa die Nanopartikeldosierung an beiden Papiermaschinen. Im experimentellen Maßstab waren solche Wirkungen dagegen nachweisbar. Es darf davon ausgegangen werden, dass Laborversuche, z. B. mit dem DFR-04, auch für schwach wirkende Retentionsadditive eine höhere Empfindlichkeit aufweisen als der Betriebsmaßstab. Solange hierfür keine Skalierfaktoren ermittelt wurden, wird eine Prognose unter Nutzung der Skalierfaktoren des Retentionspolymers vorgeschlagen.

Durch den an der PM A beschriebenen Zusammenhang zwischen Flockenindex und Formation ist eine Optimierung der Flockung im Technikumsmaßstab mit einer anschließenden Übertragung auf die Papiermaschine möglich. Diese Übertragung berücksichtigt nicht die Maschineneinstellungen. Einflüsse im Bereich der Maschine, die die Formation zusätzlich beeinflussen, sind im Betriebsmaßstab zu untersuchen.

---

#### Effiziente Optimierung des Wet End

Erstmals wurde eine systematische Vorgehensweise zur quantitativen Übertragung von Versuchsergebnissen in die Praxis erarbeitet. Diese dient als Ausgangspunkt für Anwendungen in Papierfabriken. Die Transparenz von Mechanismen im Wet End von Papierfabriken kann hierdurch gesteigert werden. Darüber hinaus verbessern sich die Prognosemöglichkeiten.

Durch eine sichere und kostengünstige Übertragung von Labor- und Technikumsversuchen können Optimierungsphasen verkürzt werden. Produktionsausfälle und Personalkosten aufgrund erfolgloser Betriebsversuche werden vermieden. Kosteneinsparungen von erheblicher Größenordnung sind möglich, wenn sich durch die Optimierung Reinigungsaufwand reduzieren lässt, Qualitätsprobleme vermieden werden und die Einsatzmengen von chemischen Additiven gesenkt werden können.

---

**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**

$\alpha$	Signifikanzniveau
AKD	Alkylketen-Dimerverbindungen
b	Regressionskoeffizient
cPAM	kationisches Polyacrylamid
CTP	Centre Technique du Papier
D	Flockendurchmesser
DFR-04	Drainage Freeness Retention, Messgerät
FI	Flockenindex
GCC	gemahlene Calciumcarbonat
HS	Holzstoff
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
kat.	kationisch
LF	Langfaser
NP	Nanopartikel
PAC	Polyaluminiumchlorid
PLS	Partial Least Squares
PM	Papiermaschine
R	paarweiser Pearsonsche Korrelationskoeffizient
RMSE	Root mean square error
RMSEV	Root mean square error of validation
s	Flockengröße
vAW	Vorhabensbezogene Leistungen der Industrie
VIP	Variable Importance in the Projection
VTT	VTT Technical Research Centre of Finland

## Literaturverzeichnis

- 1 Zeyringer E., Raser P.M., Rauch R.  
Prozessoptimierungen bei Sappi Gratkorn  
Allgemeine Papier-Rundschau 9, 16–21 (2005)
- 2 Dietz W., Kappen J., Somnitz D., Kamml G.  
Managing discontinuities in paper production  
In: Modelling and Simulation of Wet End Processes and Innovative Process Control,  
J. Kappen, W. Dietz, R. Grenz. (Hrsg.),  
Norderstedt, Deutschland (2008)
- 3 Mohlin U.B.  
Fibre dimensions – formation and strength  
Nordic Pulp and Paper Research Journal 16:3, 235–239 (2001)
- 4 ERA Print Process Commission  
Investigation on Printability of SC Paper - Final Report; (1998/99)
- 5 Bernié J.-P., Romanetti J.L., Douglas W.J.M.  
Use of components of formation for predicting print quality and physical properties of newsprint  
86th Annual Meeting, PAPTAC, A285-A291 (2000)
- 6 Odell M., Pakarinen P.  
Formation – influences and tuning  
28th EUCEPA Conference, 152–168, Lissabon, Portugal (2003)
- 7 Gerli A.  
Mechanischer, betriebstechnischer und chemischer Ansatz zur Verbesserung der Blattbildung bei  
holzfreien Papieren  
Wochenblatt für Papierfabrikation 11-12, 600–606 (2007)
- 8 Dodson C.T.J. und Schaffnit C.  
Flocculation and orientation effects on formation statistics  
Tappi J. 75:1, 167–171 (1992)
- 9 Kiviranta A.J. und Dodson C.T.J.  
Evaluating Fourdrinier Formation Performance  
J. of Pulp Pap. Sci. 21:11, 379–383 (1995)
- 10 Mohlin U-B.  
Fiber dimensions: formation and strength  
Nord. Pulp Pap. Res. J. 16:3, 235–239 (2001)
- 11 Kerekes R.J., Schell C.J.  
Characterisation of fiber flocculation regimes by a crowding factor  
J. Pulp Paper Sci. 18:1, J32-J38 (1992)
- 12 Kiviranta A.J.  
Fiber and forming-related mechanisms affecting formation  
Papermakers Conf. Tappi Press, Philadelphia, 239–245 (1996)
- 13 Jokinen O. und Ebeling K.  
Flocculation tendency of papermaking fibres  
Paperi ja Puu 67:5, 317–325 (1985)
- 14 Scott W.E., Shirt R.  
Dynamic problems in paper production systems: Development of a micro-particle retention  
simulation model  
COST E14 & PTS Environmental Symposium, Munich, Deutschland (2001)

- 15 Shirt R., Manness M.  
Dynamic simulation of retention chemistry effects using a material attribute array structure  
TAPPI Engineering Conference Proceedings, 185–195, Atlanta (1999)
- 16 Samkocwa D., Ruiz J., De Ven T., Paris J.  
Modélisation de la rétention des particules fines sur la table plate d'une machine à papier  
J. of Pulp and Paper Science 28:1, 1–5 (2002)
- 17 Cho B.-U., Garnier G.  
Filler retention with a CPAM/bentonite retention system – Effect of collision efficiency  
Nordic Pulp and Paper Res. J. 16:3, 188–194 (2001)
- 18 Donat V., Paris J., Ven T.G.M. Van De  
Simulation of a paper machine twin-wire forming section  
J. of Pulp and Paper Science 26:8, 284–288 (2000)
- 19 Cho B.-U., Garnier G., Paradis M.A., Perrier M.  
The process dynamics of filler retention in paper using a PAM/Bentonite retention aid system  
87th Annual Meeting. Book B. Conference, 31. Januar, PAPTAC Montreal (2001)
- 20 Huber P., Pierre C., Bermond C., Carré B.  
Comparing the fiber flocculation behavior of several wet-end retention systems  
Tappi J. 3:4, 19–24 (2004)
- 21 Kerekes R. J., Schell C.J.  
Characterisation of fiber flocculation regimes by a crowding factor  
J. Pulp Paper Sci. 18 J32–J38 (1992)
- 22 Huber P., Roux J.-C., Mauret E., Balgacem N., Pierre C.  
Suspension crowding for a general fiber-length distribution: Application of flocculation mixtures of short and long papermaking fibers  
J. of Pulp Paper Science 29:3, 77–85 (2003)
- 23 Huber P., Roux J.-C., Mauret E., Carré B.  
Characterising the floc size distribution of flowing pulp suspensions: from fibre flocculation to sheet formation  
Appita J. 59:1, 37–43 (2006)
- 24 Cho B.-U., Garnier G., van de Ven T.G.M., Perrier M.  
A bridging model for the effect of a dual component flocculation system on the strength of fiber contacts in flocs of pulp fibers: Implications for control of paper uniformity  
Colloids and Surfaces A: Physiochem. Eng. Aspects 287, 117–125 (2006)
- 25 Yli-Fossi T. et al.  
Estimation of paper formation using recursive least squares method  
Control Systems/Pan-Pacific Conference, 16.-18. Juni, Vancouver, PAPTAC Canada (2008)
- 26 Lenz S., Koerbitz R., Rudd J.  
Neural network modeling for paper property predictions  
2001 TAPPI/ISA-PUPID Process control, electrical, and information conference, 25.-29 März, San Antonio, TX, USA (2001)
- 27 Hubbe M.A.  
Selecting laboratory tests to predict effectiveness of retention and drainage aid programmes  
Paper Technology 44:8), 20–34 (2003)
- 28 Britt K.W.  
Mechanisms of retention during paper formation  
Tappi 56:10, 46–50 (1973)

- 29 Müttek DFR-04 Drainage Freeness Retention,  
<http://www.btg-group.com>
- 30 Zellcheming-Merkblatt V/7/61: Einheitsmethode für die Festigkeitsprüfung von Zellstoffen. G. Prüfung des Entwässerungsverhaltens. I. Schopper-Riegler-Wert, °SR (Mahlgrad).
- 31 Zellcheming-Merkblatt IV/33/57:  
Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens nach Jayme (WRV-Wert)
- 32 Strengell K., Stenbacka U., Ala-Nikkola J.  
Advanced wire part simulation with a moving belt former and its applicability in scale up on rotogravure printing paper  
Pulp and Paper Canada 105:3, 38–42 (2004)
- 33 Akribi AB, Schweden, <http://www.aak.se/DDA.htm>
- 34 Rapid-Köthen-Blattbildung, ISO 5269-2 (2004)
- 35 Dietz W.  
Modellgestützte Optimierung von Retention und Formation im Wet End von Papiererzeugungsanlagen  
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben PTS-IGF 14701 N, PTS München 2008
- 36 Næs T., Isaksson T., Fearn T., Davies T.  
A User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification,  
NIR Publications, Chichester 2002
- 37 Wise B.M. et al.  
Manual, PLS\_Toolbox 4.0 for use with MATLAB™  
Eigenvector Research Inc., Wenatchee, WA 98801, USA 2006
- 38 Bernie, J.-P., Pande H. und R. Gratton  
An instrumental determination of the effect of sheet formation on the printability of uncoated fine paper  
Tappi J. 5:10, 28–31 (2006)
- 39 Lindström T., Mähler A. and Norman B.  
Formation/retention relationships from STFI-Packforsk EUROFEX trials  
6<sup>th</sup> International Paper and Coating Chemistry Symp., Stockholm, June 7-9 (2006)
- 40 Gliese T.  
Stärke am Beispiel Feinpapiere  
ipw - Das Papier 11, 33-39 (2003)
- 41 Yli-Fossi T., Kosonen M., Lautala P.  
Modelling of retention for a dynamic paper machine simulator  
IASTED Applied Simulation and Modelling, ISBN 0-88986-397-0; 392-397, Rhodes/Greece (2004)
- 42 Svedberg A.  
Valuation of retention/formation relationships using a laboratory pilot-paper machine  
Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Fibre and Polymer Technology, Division of Fibre Technology, Stockholm (2007)
- 43 Freeman W.L.  
Chemical related factors influencing the balance of formation, drainage, and retention  
In: Papermakers Conference, Atlanta 24.-27.03.1996, 247-252; TAPPI Press 1996
- 44 Retention Drainage Analyzer (RDA), Korea Research Institute of Chemical Technology  
<http://www.kRICT.re.kr/english/index.html>