

VERBESSERUNG DER ENTWÄSSERUNG VON FASERSUSPENSIONEN DURCH OPTIMIERUNG DER WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN NASSSIEB, FLOCKE UND FÜLLSTOFFEN

C. Mannert, W. Dietz, J. Kappen

Inhalt

1	Zusammenfassung	2
2	Abstract.....	4
3	Einleitung.....	6
4	Ziel und Vorgehen.....	7
5	Untersuchung von zehn Papiermaschinen	7
5.1	Ziel und Vorgehen	7
5.2	Ergebnisse und Diskussion	8
5.2.1	Vergleich der Papiermaschinen	8
6	Nachstellen der Stoffsysteme und Optimierung im Labor	12
6.1	Ziel und Vorgehen	12
6.2	Ergebnisse und Diskussion	12
6.2.1	Einflüsse der Siebparameter auf die Gesamtretention.....	14
6.2.2	Grenzen der Laborversuche	16
7	Untersuchungen an der Versuchspapiermaschine der PTS	17
7.1	Ziel und Vorgehen	17
7.2	Ergebnisse und Diskussion	18
7.2.1	Einflüsse auf die Trockengehalte	18
8	Untersuchungen an der Nasspartie-Versuchsanlage des VTT	19
8.1	Ziel und Vorgehen	19
8.2	Ergebnisse bei gleichbleibendem Vakuumsystem.....	21
8.2.1	Wasserlinie, Trocknungsverlauf und Trockengehalt nach Sieb	21
8.2.2	Einfluss der Maschinengeschwindigkeit	23
8.2.3	Einfluss des Retentionsmittels	25
8.2.4	Ergebnisse zur Flockengröße	26
9	Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis	28
9.1	Transfer der Ergebnisse in die beteiligten Papierfabriken	28
9.2	Empfehlungen für eine Transfer der Ergebnisse in weiteren Papierfabriken	29
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	31

1 Zusammenfassung

Ziel	Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Entwässerung von Faserstoffsuspension durch die Optimierung der Wechselwirkungen zwischen Nasssieb, Flocke und Füllstoffen. Erkenntnisse für eine optimale Kombination zwischen Siebdesign und Additiveinsatz sollten gewonnen werden.
Vorgehen	Als Praxisreferenz wurden an zehn Papiermaschinen mit Langsieben der Stand der Technik und davon auftretende Abweichungen erfasst. Im Labormaßstab wurde der Einfluss variiertes Retentionsmittel und Nasssieb-Typen auf die Entwässerung und die Retention untersucht. Abschließend wurden ausgewählte Nasssiebe auf zwei Pilotanlagen (PTS und VTT) hinsichtlich erreichbarer Prozess- und Produkteigenschaften verglichen. Damit konnten der Einfluss der Geschwindigkeit und Dynamikunterschiede untersucht werden.
Ergebnisse	<p>Die untersuchten Papiermaschinen wiesen eine erhebliche Bandbreite an Einstellungen und Messwerten auf: In der Praxis konnte der gesamte Spielraum der Siebparameter wiedergefunden werden. Der DI reichte von 14,1 bis 34; FSI von 86 bis 181. Die Entwässerungsleistung lag im Bereich von 217 bis 627 l/m²/min und die Retention im Bereich von 49 bis 86 %.</p> <p>In den Laborversuchen korrelierte die Retention mit dem DI-Wert. Die Gesamtretention stieg mit dem DI-Wert. Retentionsmittel hatten einen stärkeren Einfluss auf die Retention als die Nasssiebe. Ein Zusammenhang zwischen Nasssieb-Eigenschaften und erreichter Entwässerung konnte im Labormaßstab nicht nachgewiesen werden.</p> <p>An den Versuchspapiermaschinen beeinflussten die Siebcharakteristika die initiale Blattbildung und den Verlauf des Entwässerungsprofils. Mit höheren FSI-Werten und geringeren Luftdurchlässigkeiten wurde das Entwässerungsprofil flacher. Feinere Siebe erzielten eine geringere mittlere Flockengröße nach dem Sieb. Eine Wechselwirkung zwischen Suspensions- und Siebeigenschaften hinsichtlich der Entwässerungsleistung konnte dagegen nicht nachgewiesen werden.</p>

**Schluss-
folgerung**

Wichtigstes Ergebnis einer Optimierung der Entwässerung ist ein hoher Trockengehalt nach dem Sieb. Er bietet ein für den Anlagenbetreiber nutzbares Potenzial zur Reduzierung der Energiekosten in der Trocknung. Aus den Ergebnissen des Projektes kann abgeleitet werden, dass eine Verbesserung der Entwässerung ohne Retentionsverlust nur durch eine Optimierung des gesamten Entwässerungsverlaufes erreicht werden kann.

Das Retentionsmittel PAM (hohe Molmasse und geringe Ladungsdichte) zeigte eine stärkere Flockung, höhere Retention und höhere Entwässerungsleistung im Vergleich zu PEI (geringe Molmasse und hohe Ladungsdichte). Der Retentionsmitteleinsatz ist entscheidend für die Optimierung der Retention, Entwässerung und Formation.

Die Vorgänge zu Beginn der Entwässerungsstrecke haben eine hohe Bedeutung für die Konsistenz des Faservlieses, den Verlauf der Entwässerung und damit letztlich für Retention, Trockengehalte und Papierstruktureigenschaften. Eine initial ungünstig ausgebildete Blattstruktur ist im weiteren Prozess kaum ausgleichbar. Eine optimale Retention, Entwässerung und Formation kann durch Anpassung der Maschineneinstellungen auf das aktuelle Retentions- und Stoffsystem in Verbindung mit dem eingesetzten Sieb erreicht werden.

Die Einstellung des Entwässerungsprofils stellt damit einen Freiheitsgrad dar, der verstärkt zur gezielten Optimierung von Retention, Entwässerung und Formation genutzt werden sollte. Die Verbesserung der Messbarkeit dieser Vorgänge stellt einen Schlüssel für die weitere Entwicklung dar. Hier ist weiterer Entwicklungsbedarf erkennbar.

Siebtyp und Retentionssystem können unabhängig voneinander ausgewählt und optimiert werden.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben IGF 14141 N wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert und über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) durchgeführt. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt

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

2 Abstract

Objective	Aim of this research project was the improved dewatering of pulp suspensions through optimised interactions between wire, flocculation and fillers. Findings were to be derived about how to optimally combine wire design and additive use.
Procedure	Ten industrial Fourdrinier paper machines were investigated as references, determining the state of the art and any deviations therefrom. Retention aids and wire designs were varied in the laboratory to study their effects on dewatering and retention. Finally, selected wire designs were studied in pilot paper machines (at PTS and VTT) to compare the process and product characteristics achievable by them, and investigate the effects of speed and dynamic differences.
Results	<p>The industrial paper machines differed considerably in parameter settings and measured values, with wire parameters covering the entire spectrum: DI values ranged from 14.1 to 34; FSI values from 86 to 181. Dewatering performances were in the range of 217 to 627 l/m²/min, retention levels ranged from 49 to 86 %.</p> <p>Retention was found to correlate with DI levels in the laboratory tests, with total retention increasing the higher the DI. Retention was influenced more strongly by retention aids than by wire design. No relationship was detected between wire design and dewatering results in the lab tests.</p> <p>In the pilot paper machines, however, wire characteristics were found to have an effect on initial sheet forming and dewatering profiles. Dewatering profiles were lower at higher FSI- and lower air permeability levels. Finer wires led to smaller average floc sizes after the wire. No relationship was found between suspension- and wire characteristics as regards dewatering performance.</p>

Conclusions

The main result of dewatering optimisations is high dry contents after the wire, as this enables plant operators to save energy costs for drying. The project results led to the conclusion that improved dewatering without retention losses can be achieved only by optimising the overall dewatering process.

As compared to PEI (low molar mass and high charge density), PAM (high molar mass and low charge density) was the retention aid resulting in stronger flocculation, higher retention and better dewatering performance. Retention chemicals are therefore decisive to the optimisation of retention, dewatering and formation.

Processes at the beginning of the wire section are highly important to fibre mat consistency, dewatering profiles and, in the end, also to retention, dry content and the properties of the paper structure. An unfavourable initial sheet structure can hardly be corrected or compensated for later in the process. Optimum retention, dewatering and formation are achievable by adjusting the machine settings to the retention- and stock systems and wire design actually used in each specific case.

Dewatering profile adjustments present papermakers with an additional degree of freedom which should be used more often to systematically optimise retention, dewatering and formation processes. Improved measurability of these processes is the key to making progress here, and requires further development work.

Wire design and retention system may be chosen and optimised independently of each other.

Acknowledgements

The IGF 14141 N research project was sponsored by the German Federal Ministry of Economics and Technology BMWi and carried out under the umbrella of the German Federation of Industrial Co-operative Research Associations (AiF) in Cologne. We would like to express our warmly gratitude for this support.

We would also like to thank the involved companies from the paper industry and its supply sectors for their valuable support of the project work.

3 Einleitung

Einführung Das grundlegende verfahrenstechnische Prinzip der Papierherstellung ist der Filtrationsprozess. Dabei wird eine Faserstoffsuspension über ein gewebtes Nasssieb (folgend kurz: Sieb) entwässert. Siebe sind daher seit den Anfängen der Papiererzeugung in Gebrauch. Sie beeinflussen wesentlich den zentralen Blattbildungsprozess. Eine heutige maschinelle Papierherstellung ist ohne hochleistungsfähige Siebe nicht denkbar.

Auswahl von Sieben Entscheidend für eine optimal laufende Papiermaschine ist die Auswahl des richtigen Siebes. Die heutigen Siebe bestehen aus Polyester- und Polyamid-monofilien, die zu komplexen textilen Gebilden verarbeitet werden. Dabei sind Stabilität, Abriebbeständigkeit und eine geringe Neigung zu Siebmarkierungen wichtige Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz dieser Siebe. Zur Auswahl der Siebe hinsichtlich ihres zu erwartenden Entwässerungs- und Retentionsverhaltens wurden die Kennzahlen Drainage Index (DI) von Johnson und der Fiber Support Index (FSI) entwickelt [1, 2, 3].

Die Auswahl von Sieben für die Erstausrüstung von Papiermaschinen erfolgte bisher ausschließlich auf der Basis der langjährigen Erfahrung der Zulieferer. Grundlage bilden dabei in Sortenbereich und Maschinenbau vergleichbare Papiermaschinen. Jedoch lassen die komplexen Mechanismen im Entwässerungsbereich eine optimale Siebauswahl für neue Anlagen kaum zu. Aufgrund dieses fehlenden Wissens erfolgt die Siebauswahl bei der Erstausrüstung zumeist konservativ. Erst mit den praktischen Erfahrungen kann eine Feinabstimmung des Siebes erfolgen [4, 3, 5].

Besonders schwierig gestaltet sich die Auswahl eines geeigneten Siebes bei Papiermaschinen mit häufigen Wechseln in der flächenbezogenen Masse (folgend entsprechend dem Sprachgebrauch als Flächengewicht bezeichnet). Hier sind derzeit die Erfahrungen des Anlagenpersonals unerlässlich.

Kein zugängliches Wissen Das Zusammenspiel zwischen Sieben, Faserflockung und Füllstoffen wird in der aktuellen Literatur nicht beschrieben. Veröffentlichungen, die die Auswahl von Sieben zum Thema haben, beschränken sich allein auf die Faserlänge [6, 7]. Weitere Untersuchungsmethoden der Siebhersteller sind nicht veröffentlicht. In Untersuchungen zur Entwässerung von Faserstoffsuspensionen bleibt der Einfluss anderer Siebdesigns und Siebparameter unberücksichtigt [8, 9].

4 Ziel und Vorgehen

Ziel	Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Entwässerung von Faserstoffsuspension durch die Optimierung der Wechselwirkungen zwischen Nasssieb, Flocke und Füllstoffen. Erkenntnisse für eine optimale Kombination zwischen Siebdesign und Additiveinsatz sollten gewonnen werden.
Vorgehen	<p>Das Projekt wurde in vier aufeinander aufbauenden Schritten durchgeführt.</p> <p>Mit Schritt 1 wurde eine detaillierte Analyse der Vorgänge in Praxisanlagen als Datenbasis weiterer Arbeiten vorangestellt. Damit konnte eine Übersicht der bei Einsatz von Langsieben möglichen und erreichbaren Entwässerung und Retention erarbeitet werden.</p> <p>Im Labor wurde die Entwässerung und Retention in Schritt 2 auf der Grundlage der Betriebsuntersuchungen nachgestellt und einer Optimierung zugänglich gemacht.</p> <p>Im Schritt 3 wurden die Ergebnisse der Laborversuche durch Versuche auf zwei Versuchspapiermaschinen (VPM) erweitert. Mit den durchgeführten Versuchsreihen erhält man Aussagen über die Wechselwirkungen und Optimierungsmöglichkeiten auf einer praxisnahen und kontinuierlich arbeitenden Anlage.</p>

5 Untersuchung von zehn Papiermaschinen

5.1 Ziel und Vorgehen

Ziel	Im Schritt 1 wurde an zehn Papiermaschinen mit Langsieben der Stand der Technik und davon auftretende Abweichungen aufgenommen und typische Konfigurationen herausgestellt werden.
-------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Vorgehen

Zur Beschreibung der Entwässerungssituation der Siebpartie wurden der Aufbau von Siebpartie und Konstantteil, die verwendeten Entwässerungselemente und die eingesetzten Additive sowie die zu- und abgeführten Wasser- und Stoffmengen erfasst. Relevante Betriebsdaten wurden anhand einer Parameterliste mit folgender Gliederung aufgenommen:

1. Allgemeine Daten
 2. Maschinendaten
 3. Produktionsdaten
 4. Siebdaten
 5. Entwässerungszone
 6. Sensorik
 7. Regelungen
 8. Faserstoffe/Rohstoffe
 9. Additive
-

5.2 Ergebnisse und Diskussion

5.2.1 Vergleich der Papiermaschinen

Maschinendaten Bei 9 der 10 untersuchten Papiermaschinen wurde eine Siebschüttelung zur Verbesserung der Formation eingesetzt. An die Betriebssituation angepasst wurde diese in aller Regel nicht. Bei Maschinen mit unzureichender Scherung im Stoffauflauf kann die Siebschüttelung zu Verbesserung der Formation eingesetzt werden.

Sorten und Spezifikationen

Die Häufigkeit der Flächengewichtswchsel sowie die Spezifikationen der betrachteten Papiermaschinen zeigen eine große Schwankungsbreite.

An einer Papiermaschine wird eine Vielzahl von Flächengewichtswchseln realisiert. Der optimale Arbeitsbereich des eingesetzten Siebes wird dabei häufig verlassen. Damit gestaltet sich die Abstimmung von Retention, Entwässerung und Formation schwierig. Für diese Papiermaschine liegen nur für einen Teil der Sorten Entwässerungsanalysen von Sieblieferanten vor, die die Voraussetzung für eine optimale Maschineneinstellung wären. Um über alle Sorten die notwendige Entwässerungsleistung zu gewährleisten, wird ein Sieb mit einem geringen FSI von 86 und einer hohen Luftdurchlässigkeit von 400 cfm eingesetzt. In der Praxis werden zur sortenspezifischen Optimierung vor allem die Stoffauflauf-Stoffdichte und Entwässerungselemente erfahrungsbasiert nachgestellt.

Die Aschegehalte im Papier lagen bei 12 bis 32 %.

Online-Messungen

Verschiedene Online-Sensoren waren über die standardmäßig vorhandenen Messaufnehmer hinaus in den Papierfabriken installiert.

Eine Online-Messung der Gesamtretention war an vier Maschinen installiert.

An einer Maschine wurde der Volumenstrom von Siebwasser 1 (SW I) erfasst. Die im Prozessleitsystem aufgezeichneten Daten konnten jedoch nicht exportiert werden.

Die Sensor-Ausstattung und das Prozessleitsystem konnten nur für 4 von 10 der untersuchten Papiermaschinen als modern bezeichnet werden. Eine Bewertung der Entwässerung sollte verschiedene Sorten und Betriebssituationen abdecken und beruht daher vorzugsweise auf kontinuierlichen Messungen der Entwässerungsmengen (Volumenstrom Siebwasser) oder der Trockengehalte des Faservlieses auf und nach dem Sieb.

In der Praxis wird das aktuelle Entwässerungsverhalten vom Maschinenpersonal dennoch zumindest halbquantitativ wahrgenommen, indem Hilfsgrößen betrachtet werden, wie Abstand der Wasserlinie, Energieverbrauch in der Trocknung und Feuchtegehalt im Papier. Die Bewertung ist zwangsläufig subjektiv und wird in aller Regel nicht dokumentiert.

Die Messung und Interpretation von Online-Werten der Formation im Papier gestaltete sich schwierig. Eingesetzte Messsysteme beruhten auf Lasertransmission. Bei diesen Messsystemen wird die gemessene Formation von den Flächengewichten und Aschegehalten des Papiers beeinflusst. Die gewonnenen Messdaten sind nur innerhalb von Sorten mit ähnlichem Flächengewicht und Aschegehalt vergleichbar.

Regelungen

An 3 der 10 Papiermaschinen war eine Retentionsmessung installiert, aber ohne Siebwasserkonsistenz-Regelung. Um Erfahrungen zur Aussagekraft, Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messungen zu erlangen wird, meist in einer Testphase die notwendige Messtechnik installiert. Erst auf dieser Grundlage wird über eine Regelung der Siebwasserkonsistenz entschieden. In einer Papiermaschine war die Testphase bereits abgeschlossen und eine Regelung in Planung.

Verwendete Siebe

Trotz ähnlicher Maschinenteknik wurden sehr unterschiedliche zweilagige, zweieinhalblagige und dreilagige Siebe eingesetzt. Die Siebauswahl erfolgt typischerweise vor dem Hintergrund der geforderten Prozess- und Qualitätsparameter. Neben der erzielbaren Entwässerung, Retention und Formation fließen dabei wichtige Siebeigenschaften wie Stabilität, Markierfreiheit, Abriebbeständigkeit und Kosten in die Entscheidung ein.

Stoffeigenschaften und Retention

Die Temperaturen im Stoffauflauf lagen in einem breiten Bereich zwischen 35 °C und 47 °C. Wesentliche Einflüsse auf die Temperatur sind die Kreislauf-einengung und der Energieeintrag in das System. Durch eine 10 K höhere Temperatur im Stoffauflauf kann im Mittel ein 1 % höherer Trockengehalt nach dem Pressnipp erreicht werden [10, 11].

Der Entwässerungswiderstand (Mahlgrad) im Maschinenstoff ist nicht ohne Einfluss auf die Qualitätsanforderungen veränderbar. Im Stoffauflauf wurden sehr unterschiedliche Mahlgrade im Bereich von 34 SR bis 47 SR gemessen. Diese beeinflussen erheblich die erreichbare Entwässerungsleistung.

Die Stoffdichten im Stoffauflauf lagen in einem weiten Bereich von 0,4 % bis 1,35 %. Soll die Stoffdichte zum Erreichen einer guten Formation reduziert werden, müssen bei konstantem Flächengewicht höhere Stoffmengen entwässert werden. Bei 5 der 10 Papiermaschinen war die Entwässerungsleistung am Sieb ein die Geschwindigkeit limitierender Faktor.

Es lagen erhebliche Unterschiede in der Retention vor. An einer Papiermaschine wurde bei Einsatz eines Nanopartikel-Systems bei 13 % Asche im Papier lediglich eine Gesamtretenion von 49 % erreicht. Hingegen wurde an einer weiteren Papiermaschine mit einem Mikropartikel-System bei 20 % Asche im Papier eine Retention von 85 % realisiert. Die Ursache für diesen Unterschied ist auch in der unterschiedlichen Siebentwässerung zu suchen.

Entwässerungszone

Die Trockengehalte nach dem Sieb lagen im Bereich von 19,7 % bis 23 %.

Die Entwässerungsleistungen zeigen die mittleren abgeführten Wassermengen über die gesamten für die Entwässerung zur Verfügung stehende Fläche des Siebes. Eine Papiermaschine weist die höchste Entwässerungsleistung auf, erreicht aber trotzdem mit 23 % die höchsten Trockengehalte nach dem Sieb.

Die Entfernungen des 1. Foils vom Stoffauflauf variieren stark. So beginnt die Entwässerungsunterstützung durch die Foils (Turbulenzeintrag) an einer Papiermaschine erst nach 180 cm. Damit werden der Entwässerungsverlauf, die erreichbare Retention und die erzielbare Formation stark beeinflusst. Im Bereich der initialen Entwässerung erfolgt eine vergleichsweise langsame Entwässerung.

Korrelation der Parameter

Mit den erfassten Parametern wurde einer Korrelationsmatrix erstellt. Wiedergegeben sind nur Korrelationskoeffizienten R für Korrelationen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit p kleiner 5 %:

	Flächengewicht (lutro)	Aschegehalt im Papier	Temperatur im Stoffauflauf	Mahlgrad im Stoffauflauf	Stoffdichte im Stoffauflauf	Gesamtretention	Länge Entwässerungsstrecke	1. Foil Entfernung vom Sta	Entwässerungsleistung	Trockengehalt nach Sieb	Luftdurchlässigkeit (125 Pa)	FSI	DI
Flächengewicht (lutro)	1,00												
Aschegehalt im Papier		1,00											
Temperatur im Stoffauflauf			1,00										
Mahlgrad im Stoffauflauf				1,00									
Stoffdichte im Stoffauflauf					1,00								
Gesamtretention						1,00							
Länge Entwässerungsstrecke							1,00						
1. Foil Entfernung vom Stafl								1,00					
Entwässerungsleistung						-0,77			1,00				
Trockengehalt nach Sieb					0,90					1,00			
Luftdurchlässigkeit (125 Pa)											1,00		
FSI	-0,95											1,00	
DI	-0,89											0,90	1,00

Die Korrelationsmatrix zeigt nur wenige signifikante Korrelationen. Angesichts von nur zehn Datensätzen und einer Vielzahl sich überlagernder – auch nicht erfasster und nicht quantifizierbarer – Einflüsse ist die Korrelationsanalyse begrenzt aussagefähig.

Die positive Korrelation zwischen Stoffdichte im Stoffauflauf und Trockengehalt nach Sieb entspricht der Erwartung.

Der zentrale Parameter der Entwässerungsleistung am Sieb korreliert lediglich mit der Gesamtretention. Mit höherer Retention ist die Entwässerungsleistung geringer. Als Begründung kann eine mit geringerer Entwässerungsleistung verminderte Auswaschung der Füllstoffe angenommen werden.

Darüber hinaus sinkt mit steigendem Flächengewicht der FSI-Wert. Bei höherem Flächengewicht werden im Allgemeinen Siebe mit geringerem FSI eingesetzt.

6 Nachstellen der Stoffsysteme und Optimierung im Labor

6.1 Ziel und Vorgehen

Ziel Zusammenhänge zwischen Siebeigenschaften, Retentionssystemen und Retention und Entwässerung wurden im Labormaßstab erarbeitet.

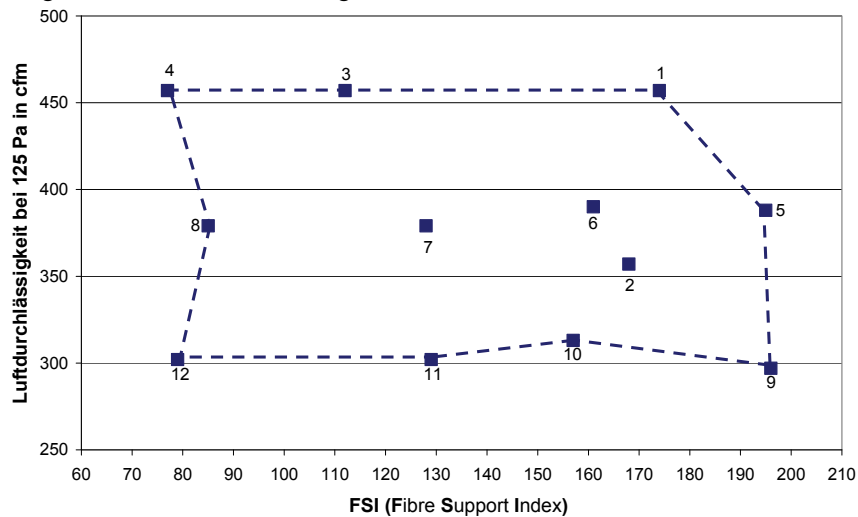
Vorgehen Im Vorfeld erfolgte in Absprache mit den beteiligten Sieblieferanten eine Auswahl von Siebdesigns. Die Entwässerung und die Retention wurden mit dem „Dynamischen Filtrationsystem“ DFS 03 der Firma BTG Instruments GmbH nachgestellt. Variiert wurden die verwendeten Nasssiebe und Additive.

Versuche am DFS Versuche mit den 12 Sieben wurden jeweils am DFS durchgeführt:

- mit 0,1 % Polyvinylamin
- mit 0,1 % Polyacrylamid
- ohne Retentionsmittel

6.2 Ergebnisse und Diskussion

Auswahl der Siebe Die ausgewählten Nasssiebe deckten den gesamten Bereich der heutzutage eingesetzten Luftdurchlässigkeiten und FSI-Werte ab:



Ergebnis der Korrelationsanalyse

Eine Korrelationsmatrix für die Siebparameter der 12 untersuchten Siebe wurde erstellt. Wiedergegeben sind nur Korrelationskoeffizienten signifikanter Korrelationen (Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 5 %):

<i>r bei $p < 0,05$</i>		Kettzahl	Schusszahl	Dicke (ungeschliffen)	Luftdurchlässigkeit	rel. Dehnung	Bruchspannung	FSI	DI	Tragpunktzahl	offenes Volumen	offene Fläche
		1/cm	1/cm	mm	cfm	%	N/cm			1/cm ²	%	%
Kettzahl	1/cm	1,00										
Schusszahl	1/cm	0,89	1,00									
Dicke (ungeschliffen)	mm	-0,91	-0,83	1,00								
Luftdurchlässigkeit	cfm				1,00							
rel. Dehnung	%	0,91	0,90	-0,87		1,00						
Bruchspannung	N/cm	-0,92	-0,82	0,82		-0,79	1,00					
FSI		0,88	0,94	-0,85		0,93	-0,75	1,00				
DI		0,71	0,65	-0,70		0,77	-0,65	0,82	1,00			
Tragpunktzahl	1/cm ²	0,82	0,90	-0,81		0,94	-0,66	0,97	0,74	1,00		
offenes Volumen	%				0,68						1,00	
offene Fläche	%	0,72	0,81	-0,73		0,89		0,86	0,65	0,93		1,00

Diskussion

Neben einer Vielzahl zu erwartender und starker Korrelationen sind auch unerwartete Korrelationen zu erkennen.

- Die Luftdurchlässigkeit korreliert nur mit dem offenen Volumen. Da die Luftdurchlässigkeit in die Berechnung des DI-Wertes einfließt, wäre auch hiermit eine Korrelation zu erwarten. Zusätzlich gehen jedoch der richtungsgebundene Koeffizient b zur Beschreibung der Gewebeart und der Fadenabstand quer zur Laufrichtung N_c mit in die Berechnung ein.

Es bestehen systematische Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern. Eine unabhängige Variation einzelner Siebparameter ist nur begrenzt möglich.

6.2.1 Einflüsse der Siebparameter auf die Gesamtretention

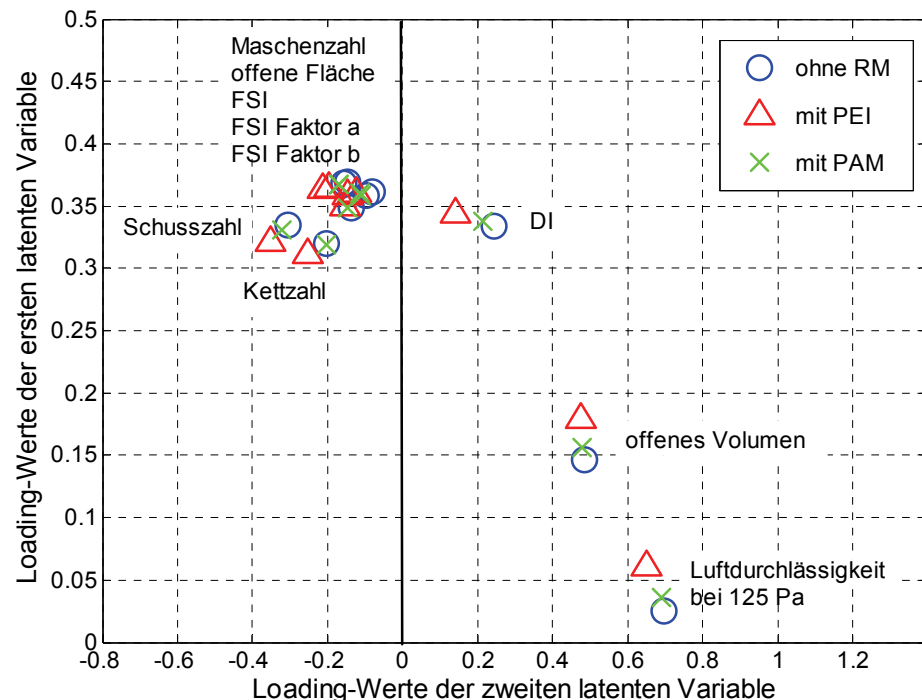
PLS-Modellierung der Retention

Die Gesamtretention wurde jeweils für die Versuchsreihen modelliert. Die PLS-Modellierungen mit bis zu zwei latenten Variablen erzielten folgende Güte:

Anzahl latente Variable		Ohne RM	Mit PEI	Mit PAM
1	y-Abdeckung (Bestimmtheitsmaß)	60,8 %	62,8 %	70,1 %
	rmse (Root mean square error)	0,42%	0,86 %	0,56 %
2	y-Abdeckung (Bestimmtheitsmaß)	74,2 %	83,6 %	87,3 %
	rmse (Root mean square error)	0,34 %	0,58 %	0,36 %

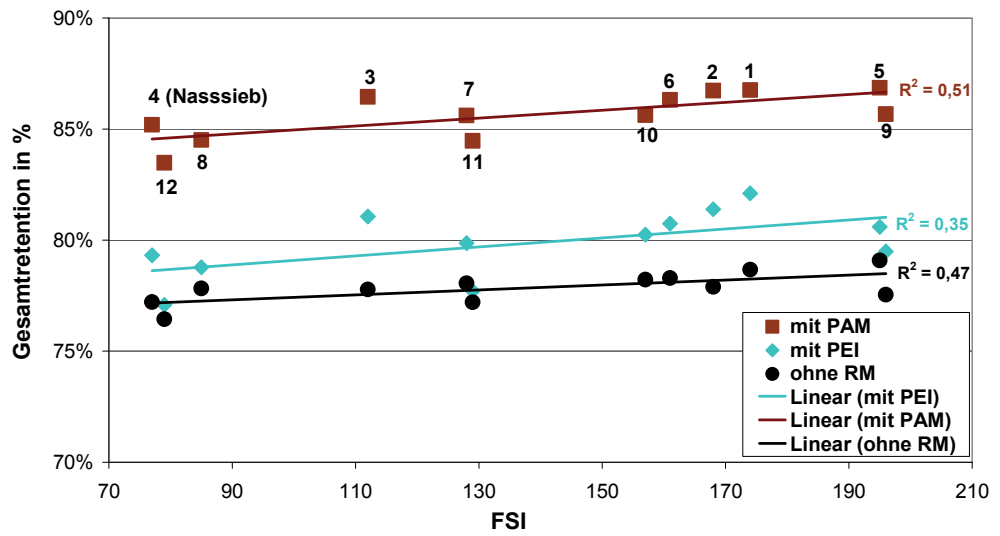
Die folgende Auftragung der Loadings der ersten und zweiten latenten Variablen zeigt, welche Siebparameter in welche latente Variable und mit welcher Stärke einfließen. Die Nähe von Variablen im Diagramm impliziert kausale Nähe; solche Variablen sind in ihrem Modelleinfluss gegenseitig ersetzbar. Wie bereits die Korrelationsmatrix auswies, hängen insbesondere FSI, Maschenzahl, Kettzahl, Schusszahl und offene Fläche nah miteinander zusammen.

Die Loadings der Parameter liegen bei allen drei Versuchsreihen (ohne RM, mit PEI und mit PAM) eng beieinander. Es ist kein Einfluss des Retentionsmittels auf den Zusammenhang zwischen Siebparameter und Retention zu erkennen.



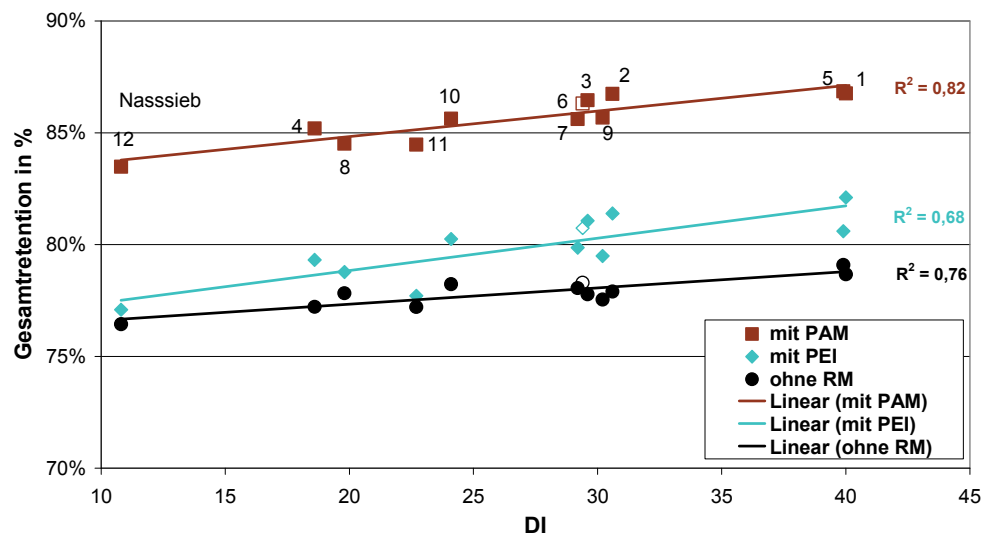
FSI und Retention

Als paarweiser Zusammenhang ist folgend die Gesamtretention über dem FSI-Wert aufgetragen:



- Die Gesamtretention steigt mit dem FSI-Wert. Zur Erklärung ist anzunehmen, dass eine höhere Faserunterstützung ein dichteres Faservlies bewirkt und damit eine bessere mechanische Retention von Füllstoffen.
- Die gleichen Abweichungsmuster der Einzelwerte von den Regressionsgeraden zeigen in Übereinstimmung mit den Modellierungsergebnissen, dass nicht allein der FSI die Retention bestimmt. Zusätzlich relevant ist in jedem Fall die Luftdurchlässigkeit.

DI und Retention



Diskussion

Mit der Luftdurchlässigkeit wie auch mit dem DI-Wert steigt die Gesamtretektion geringfügig an.

- Obwohl die Berechnungsformel des Siebparameters DI auch richtungsabhängige Komponenten enthält, wie den Koeffizienten b zur Beschreibung der Gewebearart und den Fadenabstand quer zur Laufrichtung, korreliert dieser Parameter mit der Gesamtretektion im DFS am stärksten. Die Bestimmtheitsmaße sind für alle drei Versuchsreihen gut.
 - Insgesamt hat die Retentionsmittelwahl einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Retention als die Wahl der Siebparameter.
-

6.2.2 Grenzen der Laborversuche

Grenzen der Laborversuche

Die initiale Faserretention wird auch von der Ausrichtung der Einzelfasern bestimmt. Fasern in Maschinenrichtung werden dabei häufiger retendiert als Fasern in Querrichtung [12]. Dieser an Papiermaschinen auftretende Mechanismus wird in Labormethoden zur Retentions- und Entwässerungsmessung (DFR, DDA, Britt-Jar) nicht reproduziert. Hier muss von einer ungerichteten Faserorientierung ausgegangen werden. Da die Formeln für die Siebparameter DI und FSI Beiwerte für die Gewebearart in Maschinenrichtung und Querrichtung enthalten, können DI und FSI die im Labormaßstab beobachteten Zusammenhänge nicht vollständig beschreiben. Aber auch die empirisch bestimmten Luftdurchlässigkeiten beschreiben das Retentionsverhalten der Siebe im Labor nicht vollständig.

Schon ein sehr dünnes Faservlies besitzt einen höheren Entwässerungswiderstand als das eingesetzte Sieb [13]. Die Entwässerungsmenge wird damit hauptsächlich durch das Entwässerungsverhalten des Faservlieses bestimmt. Die Siebeigenschaften beeinflussen jedoch die sich bildenden Faservliese und deren Filtrationseigenschaften. Damit beeinflussen die Siebe indirekt die Entwässerungsmenge. Dieser Einfluss konnte in den untersuchten Labormethoden nicht dargelegt werden.

Des Weiteren ist das entscheidende initiale Entwässerungsverhalten (< 1 s) mit dem DFS nicht verlässlich beschreibbar.

7 Untersuchungen an der Versuchspapiermaschine der PTS

7.1 Ziel und Vorgehen

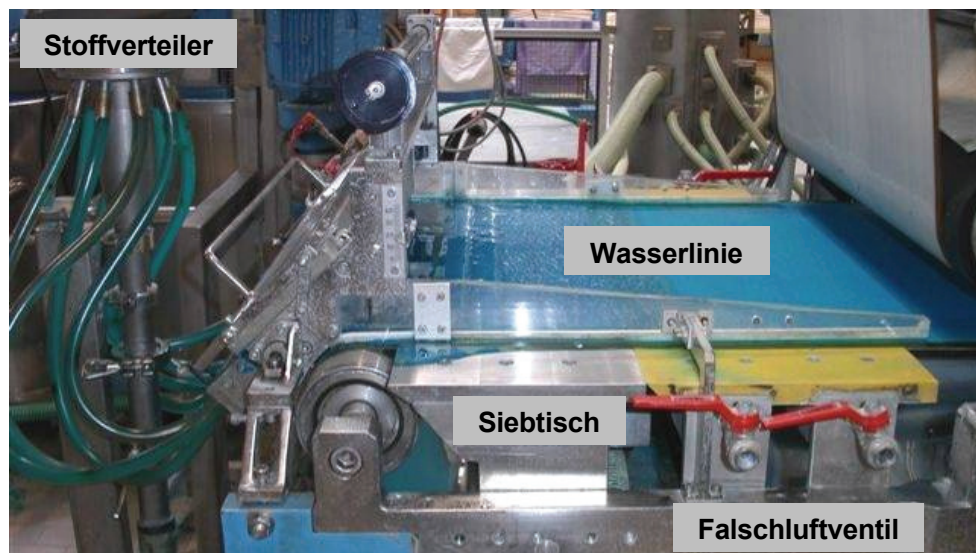
Ziel Um im Pilotmaßstab den Einfluss variiert Retentionsmittel und Siebe auf die Entwässerung, Retention und Formation zu bestimmen, wurden Versuche an der VPM der PTS ausgeführt.

Vorgehen Drei unterschiedliche Siebe und zwei unterschiedliche Retentionsmittel wurden eingesetzt.

Das prinzipielle Vorgehen war wie folgt: Die Siebe wurden nacheinander eingezogen. Nach Einbau eines Siebes wurde nur mit Faserstoff ein Flächengewicht von 60 g/m^2 eingestellt. Durch Regulieren des Falschluffventils am Vakuumsystem wurde die Wasserlinie eingestellt. Die Einstellung des Falschluffventils blieb für alle Versuche eines Siebes konstant. Bei jeder Versuchseinstellung – und damit gegebenenfalls anderer Ascheretention – wurde durch Nachregeln der Füllstoffdosierung ein Flächengewicht von 80 g/m^2 eingestellt. Damit wurde der gleiche Füllstoffgehalt im Papier erzielt.

Betrachtet wurden der Entwässerungs- und Trocknungsverlauf und die erzielte Retention.

Versuchsanlage Die Entwässerung erfolgt durch einen Nasssauger direkt nach dem Siebtisch. Die Einstellung des Abstandes der Wasserlinie erfolgt mittels Falschluffventil am Saugkasten.

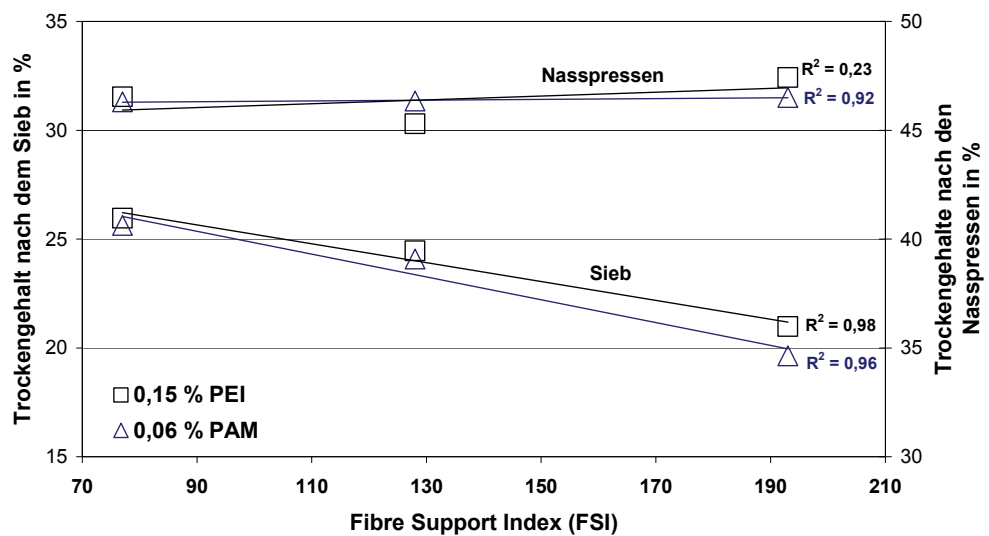


7.2 Ergebnisse und Diskussion

7.2.1 Einflüsse auf die Trockengehalte

FSI und Trockengehalt

Den Zusammenhang zwischen Trockengehalt und FSI nach dem Sieb und nach den Nasspressen bei Einsatz unterschiedlicher Siebe und Retentionsmittel zeigt folgende Abbildung:



Diskussion der Trockengehalte nach Sieb

Der Abstand der Wasserlinie wurde bei diesen Versuchen für jedes Sieb eingestellt. Mit der Annahme, dass die Trockengehalte auf Höhe der Wasserlinie gleich sind, wurde erwartet, dass auch die Trockengehalte nach dem Sieb für alle Siebe gleich sind und damit die Retention und die Formation bei gleicher Entwässerungsleistung verglichen werden können. Die Trockengehalte nach dem Sieb sanken jedoch mit steigendem FSI-Wert.

Der FSI beschreibt die Faserunterstützung auf der Papierseite. Mit hohem FSI und einhergehender Faserunterstützung werden die Fasern im initialen Blattbildungsbereich gleichmäßig und dicht angeordnet. Damit bildet sich ein homogenes und dichtes initiales Faservlies, das Feinstoffe und besonders Schleimstoffe gut retendiert. In erster Betrachtung wäre daher eine schlechtere Entwässerung zu erwarten.

Der beobachtete Verlauf widerspricht dem. Folgende Mechanismen sind anzunehmen: Die Unterschiede im Entwässerungsverhalten der Siebe werden zuerst durch das Nachstellen des Vakuums bei der Einstellung der Wasserlinie bis zum Ende der Wasserlinie gleichmäßig.

Folgend beeinflusst das initiale Faservlies auch den Entwässerungsverlauf nach der Wasserlinie. Die Entwässerungsfähigkeit eines dichteren Faservlieses (hoher FSI) ist geringer, es wird weniger Wasser entwässert und der Endtrockengehalt ist niedriger als bei niedrigem FSI. Die Unterschiede im Endtrockengehalt werden also erst im Bereich nach der Wasserlinie verursacht.

Diskussion der Trockengehalte nach Presse

Die Trockengehalte nach der Nasspresse waren unabhängig von den Trockengehalten vor Nasspresse weitgehend konstant. Als Grund ist eine Vergleichmäßigung der Trockengehalte durch die Nasspresse anzusehen.

Folgende Mechanismen sind anzunehmen: Der maximale Trockengehalt nach dem Sieb von 26 % liegt oberhalb praxisüblicher Werte. Hohe Trockengehalte im Eingang zur Nasspresse können sich negativ auf deren Entwässerungsleistung auswirken. Die höheren Trockengehalte können dann nicht in die anschließende Trocknung übergeben werden. Folglich ist eine optimale Abstimmung zwischen Nasspressen und Sieben entscheidend zum Erreichen hoher Trockengehalte.

8 Untersuchungen an der Nasspartie-Versuchsanlage des VTT**8.1 Ziel und Vorgehen****Ziel**

In Erweiterung des ursprünglich geplanten Vorgehens wurden verschiedene Siebe auf einer Versuchsanlage mit kontrollierbarem Entwässerungsverlauf untersucht.

Vorgehen

Das Forschungsinstitut VTT, Finnland, verfügt über eine geeignete Nasspartie-Versuchsanlage. Das Institut konnte dafür gewonnen werden, die Anlage für Siebversuche zur Verfügung zu stellen.

Es wurden die gleichen Siebe wie in den PTS-Versuchen sowie ein weiteres Sieb eingesetzt. Unterschiedliche Dynamiken im Stoffauflauf wurden durch Variation der Maschinengeschwindigkeit von 2 m/s auf 3 m/s realisiert. Zwei Varianten der Vakuumeinstellung wurden vergleichend umgesetzt. Beide Varianten grenzen sich vom Ansatz an der PTS-VPM ab, bei dem die Wasserlinie geregelt wurde (Kap. 7).

Gleichbleibendes Vakuumsystem

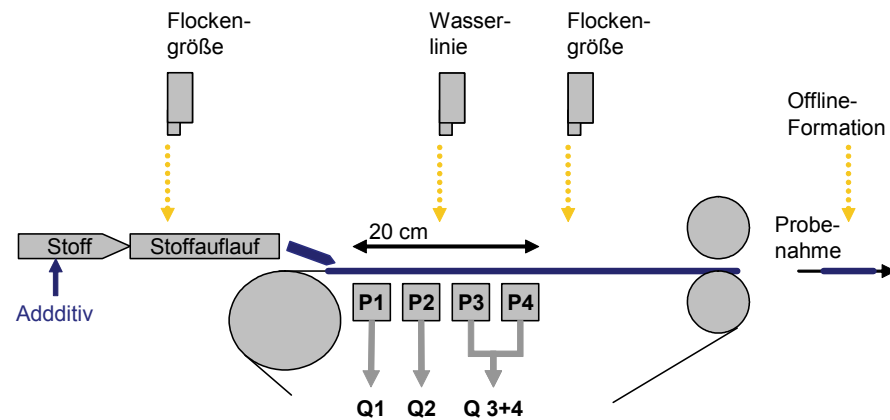
Bei den Versuchen mit gesteuertem Vakuum blieben die Einstellungen des Vakuumsystems (Pumpe, Falschluffventil) für alle Siebe gleich. Damit variierte die Wasserlinie. Das Vakuum in den Nasssaugern ergab sich jeweils aus den Versuchsbedingungen.

Geregeltes Vakuum

Bei den Versuchen mit geregelttem Vakuum wurden das Vakuum im 1. Nasssauger für jeden Versuchspunkt manuell über das Falschluffventil auf einen Sollwert eingestellt.

**Nasspartie-
Versuchsanlage**

Die Versuchsanlage besteht aus einer mit Dampf temperierbaren Vorratsbütte, in der die Stoffdichte eingestellt und der Füllstoff dosiert wird. Der Konstantteil verfügt über eine Additivdosierstelle, an der das Retentionsmittel eingebracht wird. Die Maschinengeschwindigkeit beträgt bis zu 3 m/s. Die Anlage umfasst keine Pressen, keine Trockenpartie und keine Aufrollung.

**Stoff- und Retentionssystem**

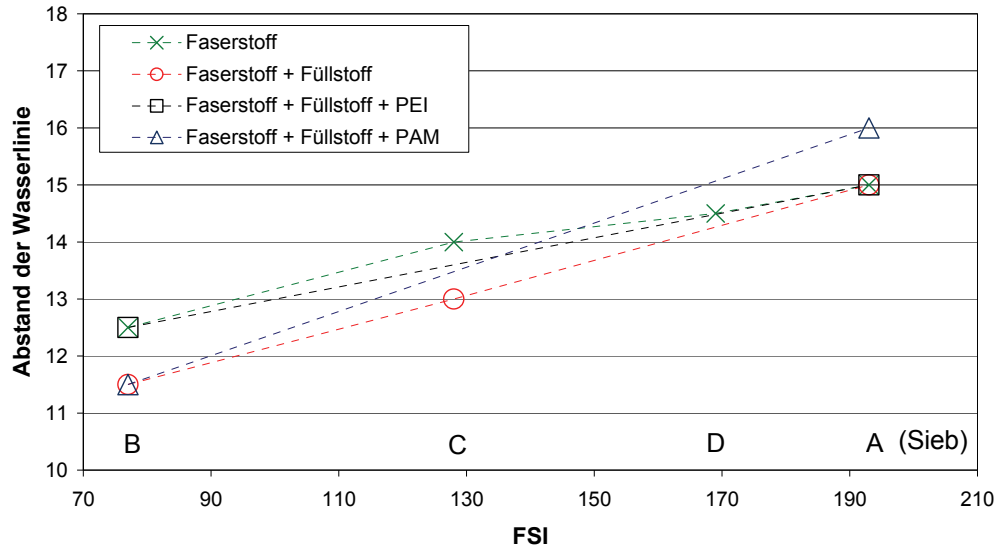
Die Versuche wurden jeweils mit folgenden Stoff- und Additivsystemen durchgeführt:

- Faserstoff,
- Faserstoff + Füllstoff
- Faserstoff + Füllstoff + PEI
- Faserstoff + Füllstoff + PAM

8.2 Ergebnisse bei gleichbleibendem Vakuumsystem

8.2.1 Wasserlinie, Trocknungsverlauf und Trockengehalt nach Sieb

Wasserlinie Die Abbildung zeigt den Einfluss des FSI der vier untersuchten Siebe auf den Abstand der Wasserlinie für eine Maschinengeschwindigkeit von 3 m/s:

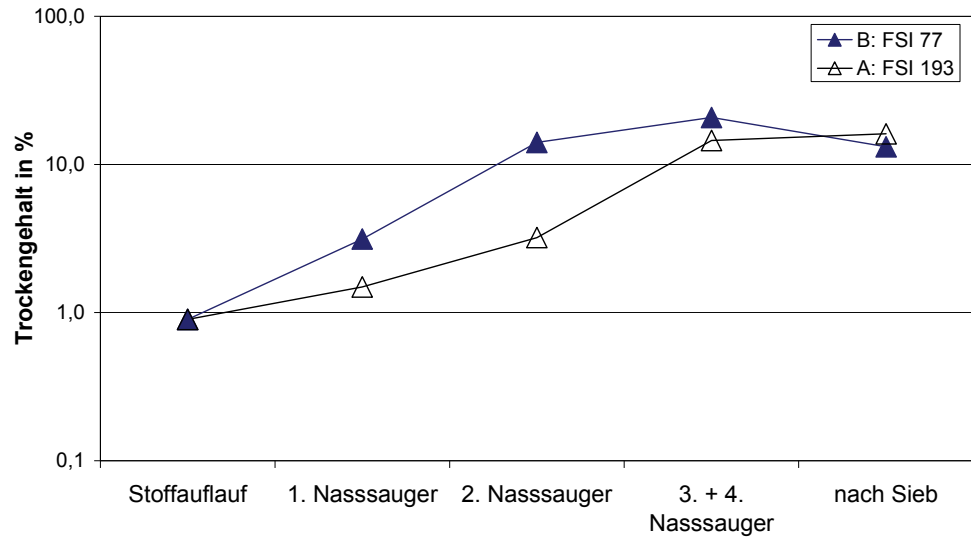


Diskussion

Mit steigendem FSI entfernen sich die Wasserlinien bei allen Stoff- und Retentionssystemen vom Stoffauflauf. Grund hierfür ist vermutlich nicht in erster Linie die steigende Faserunterstützung des Siebes, sondern die bei den Versuchssieben damit verbundene geringere Luftdurchlässigkeit. Die Entwässerung verläuft langsamer.

Trocknungsverlauf

Beispielhaft zeigt die folgende Abbildung den Trocknungsverlauf bei einer Maschinengeschwindigkeit von 2 m/s. Die Trockengehalte am Stoffauflauf und nach dem Sieb wurden gemessen, die Trockengehalte auf dem Sieb aus den Entwässerungsmengen der Nasssauger berechnet. Als Stoff- und Retentionsystem wurde „Füllstoff + Faserstoff + PAM“ eingesetzt.

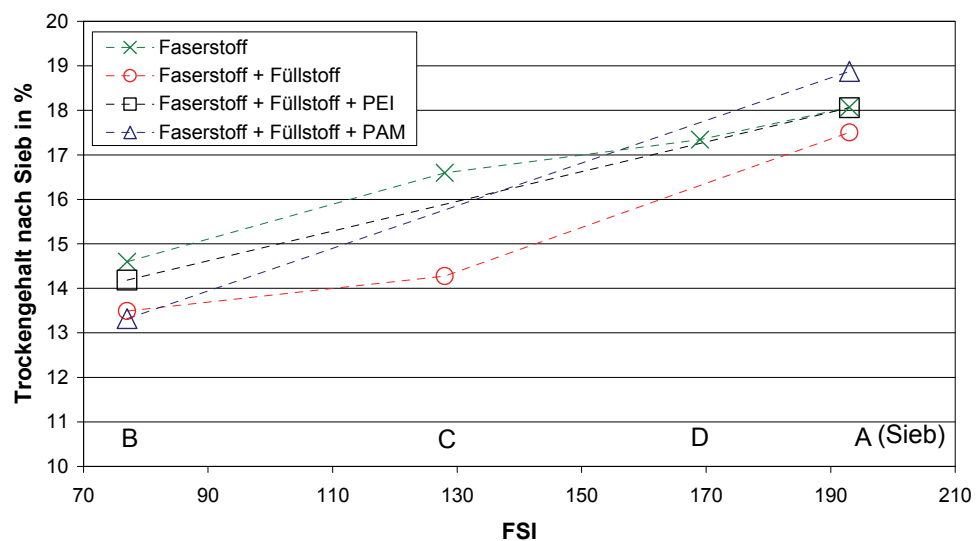


Diskussion Trocknungsverlauf

Sieb A mit höherem FSI von 193 weist ein flacheres Entwässerungsprofil auf als Sieb B. Der Trockengehaltanstieg ist erst schwächer, am 3. und 4. Nasssauger wird dann stark entwässert. Die Trockengehalte nach dem Sieb liegen im Effekt bei Sieb A höher als bei Sieb B.

FSI und Trockengehalt

Der Effekt ist im gesamten Versuchsfeld zu beobachten: Mit dem FSI-Wert steigen die Trockengehalte nach dem Sieb – hier dargestellt für eine Maschinengeschwindigkeit von 3 m/s:



Diskussion

Höhere Trockengehalte bei langsamerer Entwässerung erscheinen in erster Sicht widersprüchlich. Dieses Phänomen konnte anhand der Versuche deutlich belegt werden. Flachere Entwässerungskurven führen zu letztlich höheren Trockengehalten.

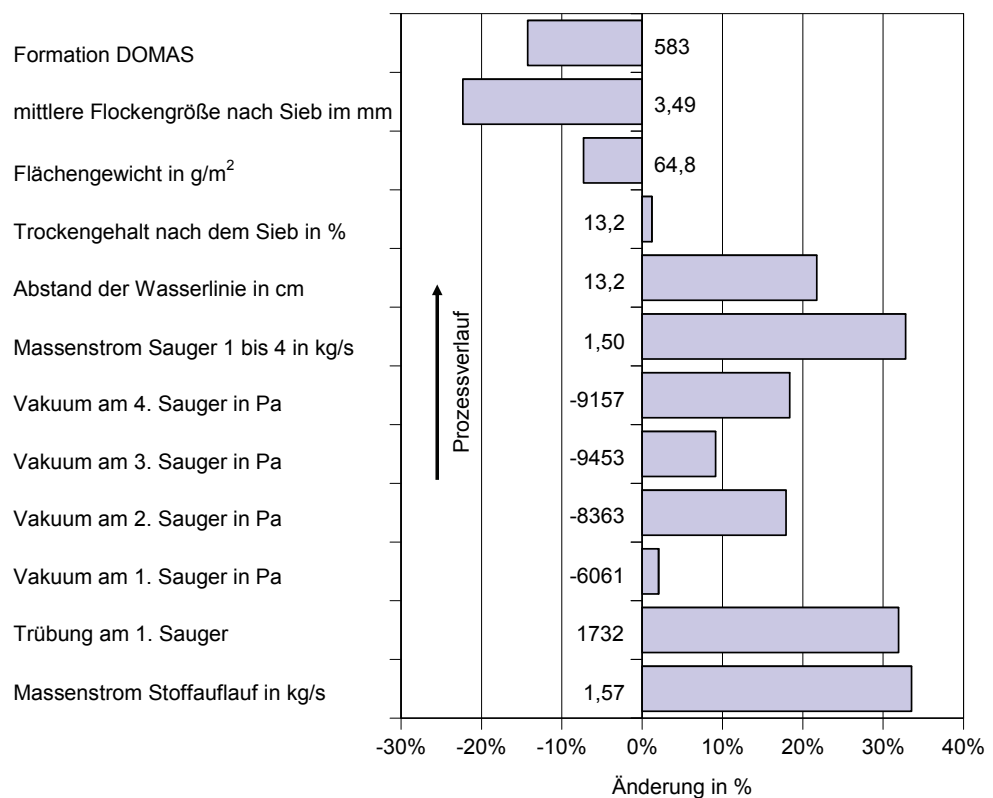
Zur Erklärung ist anzunehmen: Bei höherem FSI – damit geringerer Luftdurchlässigkeit – verläuft die Entwässerung schonender. Es ergibt sich eine weiter entfernte Wasserlinie. Aufgrund der langsamen Entwässerung bildet sich ein offenes initiales Faservlies. Erreicht das Faservlies nun den 3. und 4. Nasssauger, kann dort mehr Wasser entzogen werden.

Zusätzlich eine Rolle spielen kann eine durch die hohe Faserunterstützung gleichmäßigere Ablagerung der Fasern auf dem Sieb, damit eine bessere Formation. Gleichmäßigere Formation bei geringerer Luftdurchlässigkeit kann zu einem höheren Differenzdruck nach der Wasserlinie führen. Es kann ebenfalls mehr Wasser abgeführt werden.

8.2.2 Einfluss der Maschinengeschwindigkeit

Vergleich zweier Maschinengeschwindigkeiten

Um die Auswirkungen der Maschinengeschwindigkeit im Überblick aufzuzeigen werden zentrale Messgrößen bei 3 m/s relativ zu 2 m/s dargestellt. Exemplarisch dargestellt ist das Stoffsystem Faserstoff + Füllstoff + PAM mit dem Sieb B (FSI = 77). Positive Werte bedeuten im Betrag höhere Messwerte bei 3 m/s. Die Werte für 2 m/s sind angemerkt:



Diskussion

Bei gleicher Ausgangsstoffdichte sind die auf dem Sieb abzuführenden Wassermengen bei höherer Maschinengeschwindigkeit größer. Nimmt man eine von der Maschinengeschwindigkeit unabhängige Entwässerungsleistung an, so werden die Entwässerungsprofile zwangsläufig flacher. Die größeren Wassermengen können in der kürzeren Zeit nicht vollständig entwässert werden. Der Abstand der Wasserlinie steigt.

Für die Interpretation ist zu beachten, dass sich die Messpunkte (Volumenströme der Nasssauger) bei höherer Geschwindigkeit in zeitlicher Sicht der Entwässerung vorlagern. Dies erklärt das flachere Entwässerungsprofil bei höherer Maschinengeschwindigkeit.

Der Vergleich zeigt ein identisches Vakuum im 1. Sauger. Im 2. bis 4. Sauger steigen die Vakua mit steigenden Maschinengeschwindigkeiten. Zu begründen ist dies mit dem größeren Abstand der Wasserlinie und dem damit geringeren Druckabfall an den Nasssaugern.

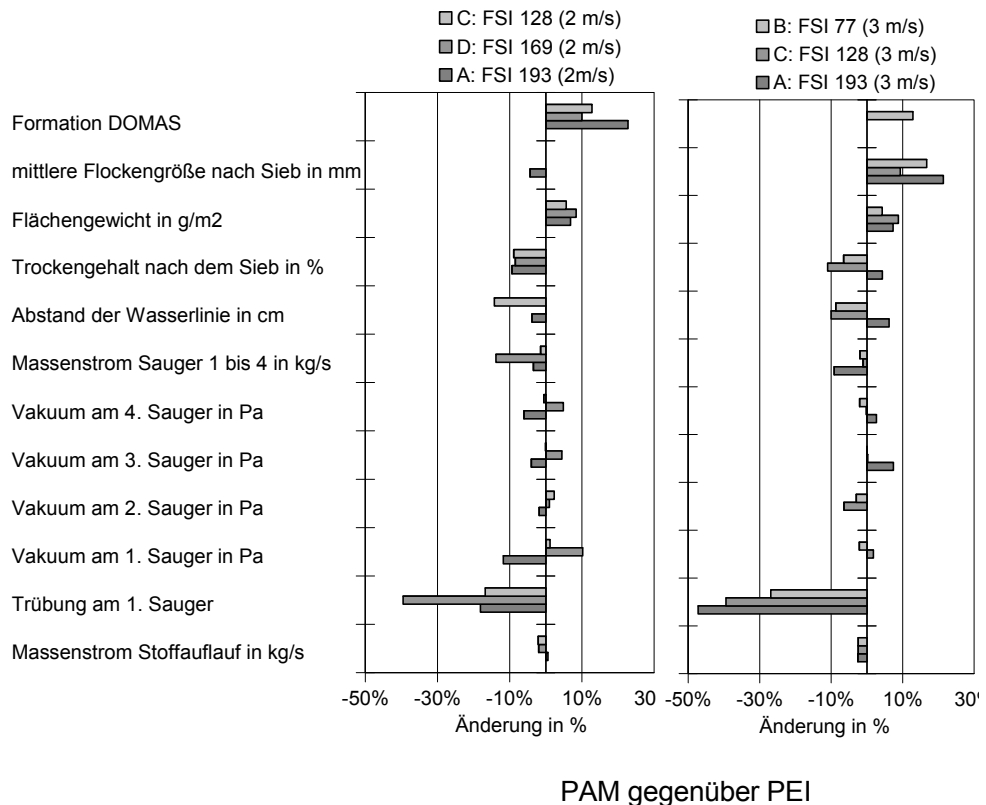
Bei 3 m/s verschiebt sich die Wasserlinie gegenüber 2 m/s in Richtung des 3. und 4. Nasssaugers. Trotzdem ist der Trockengehalt nach Sieb gleich. Als Grund ist wie im Vergleich der Siebe (Kap. 8.2.1) ein flach verlaufendes Entwässerungsprofil anzunehmen. Erst bei 3 m/s wird unter den Versuchseinstellungen die Entwässerungskapazität des 3. und 4. Saugers ausreichend genutzt.

Darüber hinaus wird mit höherer Geschwindigkeit die Flockengröße auf dem Sieb und die Formation im Papier (Formation Powerspektrum) deutlich verbessert. Auch eine bessere Formation und ein gleichmäßigeres Blattgefüge können die Entwässerung beeinflussen.

8.2.3 Einfluss des Retentionsmittels

Ergebnis des Einflusses des Retentionsmittels

Folgende Abbildung vergleicht die Retentionsmittel PAM und PEI. Positive Werte beschreiben im Betrag höhere Messwerte bei PAM gegenüber der Referenz PEI. Maschinengeschwindigkeiten von 2 und 3 m/s und unterschiedliche Siebe wurden untersucht. Ein Teil der Datenbasis wurde bereits oben für den Einfluss der Geschwindigkeit ausgewertet.



Diskussion

Bei Einsatz von PAM ist die Siebwassertrübung bei allen Versuchen geringer. Ursache ist die stärkere Flockungswirkung des PAM und eine damit verbundene Agglomeration der Füllstoffteilchen und Anlagerung an die Fasern.

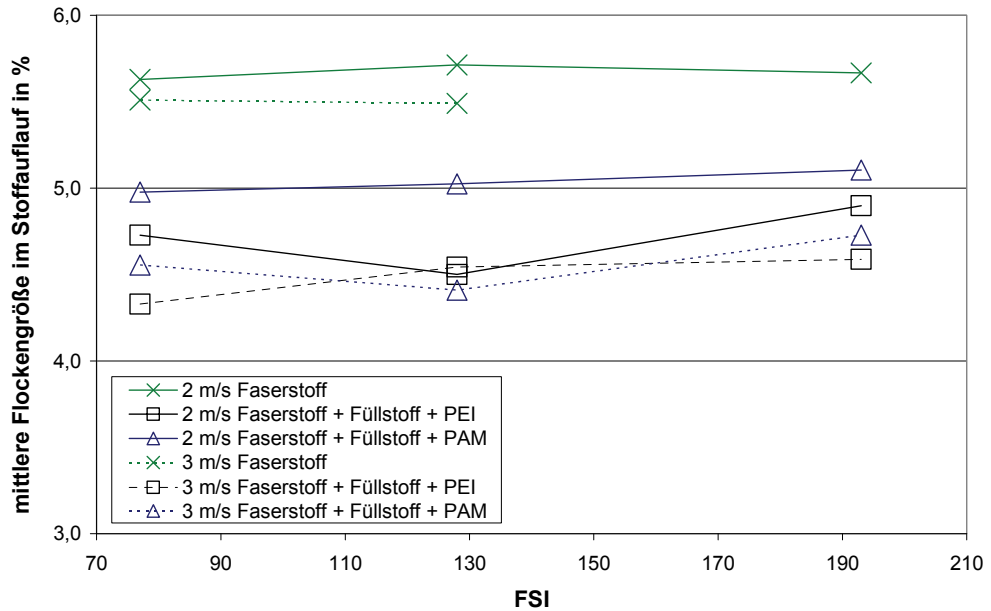
Wieder ist der gleichgerichtete Zusammenhang zwischen Wasserlinie und Trockengehalt nach Sieb zu erkennen: Mit PAM sind sowohl Endtrockengehalt als auch der Abstand der Wasserlinie geringer.

Zu beachten ist ein höheres Flächengewicht durch den Einsatz von PAM, das auf einer besseren Retention beruht. Bis auf eine Ausnahme sind die mittlere Flockengröße nach dem Sieb und der Formationsindex im Papier bei Einsatz von PAM höher – die Formation wird schlechter.

8.2.4 Ergebnisse zur Flockengröße

Flockengröße im Stoffauflauf

Die Darstellung zeigt die mittlere Flockengröße im Stoffauflauf im Versuchsverlauf bei Einsatz der Siebe mit unterschiedlichen FSK-Werten. Die Versuche wurden bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Stoff-/Retentionssystemen durchgeführt:



Versuchskonstanz

Die mittleren Flockengrößen sind über die Versuchstage hinweg nahezu konstant.

Geschwindigkeitseinfluss

Bei allen Stoff- und Retentionssystemen ist die mittlere Flockengröße bei 3 m/s niedriger als bei 2 m/s. Dies ist mit einer stärkeren Scherung zu begründen.

Faserstoff und Füllstoff

Die höchste mittlere Flockengröße wurde bei den Versuchen ohne Einsatz von Füllstoff im reinen Faserstoffsystem gemessen. Füllstoffe, Füllstoffagglomerate und Füllstoff-Feinstoff-Agglomerate werden in der Messung anteilig miterfasst und reduzieren daher die mittlere Flockengröße.

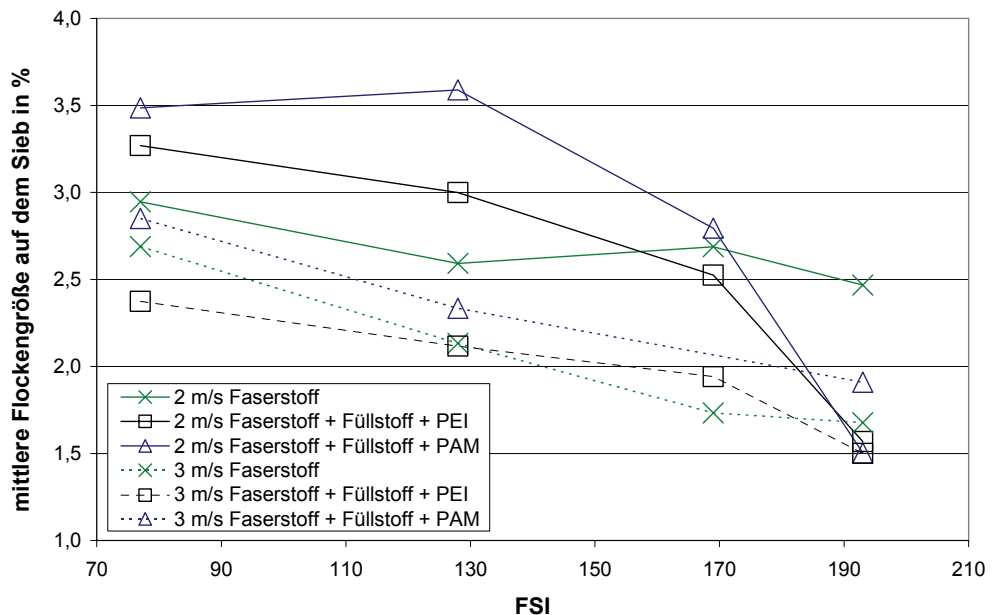
Mit Füllstoff und ohne Retentionsmittel war aufgrund der starken Trübung keine Messung möglich. Mit Retentionsmitteln werden die Füllstoffe an die Fasern fixiert und die Suspension klar auf.

Einfluss des Retentionsmittels

Bei Einsatz von PAM sind die Flocken tendenziell größer als bei Einsatz von PEI. Durch die hohe Kettenlänge des PAM können sich verstärkt große Flocken bilden.

Flockengröße am Siebende

In der Abbildung sind die Flockengrößen am Siebende dargestellt:



Diskussion

Im Vergleich mit der Flockengröße im Stoffauflauf zeigt sich: Am Siebende ist die mittlere Flockengröße stets geringer als im Stoffauflauf. Die Reduzierung ist auf die Scherung am Stoffauflauf und bei der Blattbildung zurückzuführen.

Im gesamten Versuchsfeld nimmt die mittlere Flockengröße mit steigendem FSI-Wert ab. Verschiedene Effekte sind zur Erklärung dieser Beobachtung zu diskutieren:

- Bei höherem FSI-Wert ist die Entwässerung zu Beginn der Entwässerungsstrecke langsamer (s. Kap. 8.2.1). Bei einer Maschinengeschwindigkeit von 3 m/s und einer beobachteten Verschiebung der Wasserlinie bei FSI 193 um etwa 3 cm gegenüber FSI 77 braucht das Faservlies ca. $\frac{1}{100}$ s länger, um die Wasserlinie zu erreichen. Wie sich dies auswirkt, ist ohne weitere Untersuchungen nicht bewertbar. Eine Scherung der Flocken durch länger wirksame Turbulenzen auf dem Sieb würde die Beobachtung erklären; der gegenläufige Effekt einer Flocken-Reagglomeration kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.
- Eine gegebenenfalls höhere Füllstoff- und Feinstoffretention dies erhöht den Anteil an Feinpartikeln; dies reduziert die Flockengröße im Mittel.
- Ein weiteres Phänomen ist die stärkere Faserunterstützung und gleichmäßigere Anordnung der Fasern auf dem Sieb bei höherem FSI-Wert. Damit lagern sich Füll- und Feinstoffteilchen sowie deren Agglomerate mit geringerer Ballung in das Faservlies ein.

Eine Wichtung der Aspekte und abschließende Erklärung der Flockengrößeneffekte ist anhand der Versuchsergebnisse nicht möglich.

9 Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis

Potenziale für eine Umsetzung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Vorhabens ermöglichten

- ein vertieftes Verständnis der bei der Entwässerung wirksamen Mechanismen und
- eine genaue Kenntnis der Wirksamkeit der Stellfaktoren für eine Verbesserung der Entwässerung.

Im Fazit ermöglichen die Ergebnisse damit eine verbesserte Interpretation der Ursachen von Praxisproblemen mit der Entwässerung. Verallgemeinerbare Erkenntnisse und deren konkrete Anwendung in den untersuchten Betrieben sind im Folgenden beschrieben.

9.1 Transfer der Ergebnisse in die beteiligten Papierfabriken

Vorgehen bei dem Transfer

Bei den Datenaufnahmen in Papierfabriken (Kap. 5) ermittelte Optimierungsansätze wurden im Anschluss an die durchgeführten Systemanalysen mit den Anlagenbetreibern diskutiert.

Basis der Diskussion mit den Betreibern waren neben den Ergebnissen der Analysen die Ergebnisse der Labor und Pilotversuche.

Optimierungspotenziale

Die Untersuchungen an den Papiermaschinen ließen auf Optimierungspotenziale hinsichtlich der erreichbaren Entwässerungsleistung schließen: Die untersuchten Papiermaschinen wiesen eine erhebliche Bandbreite an Entwässerungsleistungen von 217 bis 627 l/m²/min auf. Nach Aussage der Anlagenbetreiber war die Entwässerungsleistung bei 5 der 10 Papiermaschinen ein die Produktionsgeschwindigkeit limitierender Faktor. An diesen Papiermaschinen stellten die gezielte Einstellung des Entwässerungsverlaufes und die erreichbare Entwässerungsleistung ein nutzbares Potenzial dar.

Exemplarischer Transfer der Ergebnisse in Papierfabriken

Empfehlungen für eine verbesserte Entwässerung und Retention in Kombination mit einem Einsatz der optimalen Siebe wurden zusammen mit den Industriepartnern erarbeitet. U.a. wurden folgende Maßnahmen diskutiert und/oder initiiert:

- Ausrichtung des Siebtisches und Verbesserung der damit verbundenen initialen Entwässerung,
- Anpassung der Foilwinkel zur Einstellung des Entwässerungsprofils und
- Austausch von Entwässerungselementen.

Die Installation zusätzlicher Messtechnik wurde, so nicht vorhanden, an allen Papiermaschinen für folgende Parameter angeregt:

- Entwässerung,
 - Retention und
 - Ladung.
-

Beispielfall

Die an einer Anlage beobachtete Geschwindigkeitslimitierung stellt ein erhebliches, wirtschaftlich relevantes Optimierungspotenzial dar. Durch eine Verbesserung der Entwässerung kann der Trockengehalt nach der Presse gesteigert werden. Die Nutzung dieses Optimierungspotenzials hinsichtlich erreichbarer Trockengehalte nach dem Sieb sahen die Anlagenbetreiber zunächst aufgrund der häufigen Sortenwechsel nicht.

Das im Rahmen des Projektes gewonnene verbesserte Verständnis der Mechanismen in der Entwässerungszone ermöglichte an dieser Papiermaschine im Fazit eine schnellstmögliche Anpassung der Maschinenparameter bei Sortenwechsel. Bereits die Kenntnis und der konsequente Einsatz aller Stell-schrauben zur effizienten Anpassung des Entwässerungsprofils auf die aktuelle Produktion bergen erhebliche Optimierungspotenziale.

9.2 Empfehlungen für eine Transfer der Ergebnisse in weiteren Papierfabriken

**Prozessanalyse /
Problembeschreibung in der
Praxis**

Die Erkenntnisse des Vorhabens können auch von weiteren Betreibern genutzt werden. Dabei steht am Beginn einer jeden Optimierung in der Praxis die Prozessanalyse. Dabei sollte folgenden Aspekten besondere Beachtung geschenkt werden:

Optimierungspotenziale sind verstärkt bei Papiermaschinen mit geringen Trockengehalten nach dem Sieb bei gleichzeitig geringem Abstand der Wasserlinie vom Stoffauflauf zu sehen. Der zur Verfügung stehende Entwässerungsbereich des Siebes wird hier nicht in vollem Umfang ausgenutzt. Darüber hinaus lässt sich aus dem Verhältnis des Abstands der Wasserlinie und dem Trockengehalt ein Parameter zur Bewertung der Entwässerungsperformance ableiten.

Bei Langsieben wird die initiale Entwässerungsleistung durch den Auftreffpunkt und den Auftreffwinkel des Stoffstrahls auf den Siebtisch und die folgenden Entwässerungselemente bestimmt. Hohe Entwässerungsleistungen im initialen Entwässerungsbereich gehen mit einer überproportional starken Vliesverdichtung einher. Um den Entwässerungsverlauf in der Praxis zu überprüfen und zu optimieren, müssen zusätzlich Entwässerungsanalysen (Aufnahme des Entwässerungsprofils) der Sieblieferanten eingesetzt werden.

Bei Papiermaschinen mit einer hohen Retention und geringen Entwässerungsleistungen kann die Entwässerung auf Kosten der Retention verbessert werden. Der Nachteil einer reduzierten Retention ist einem Vorteil durch die höhere Entwässerung entgegzustellen.

Erfolgsfaktoren für eine Verbesserung als Leitparameter für eine Optimierung

Als wesentliche Erfolgsfaktoren für die Verbesserung der Entwässerung von Faserstoffsuspensionen haben sich herausgestellt:

- Kenntnis aller Siebparameter und deren Wirkung auf den Entwässerungsverlauf, Retention und Formation
 - Einstellung der Initialentwässerung und des gesamten Entwässerungsverlaufes
 - Anpassung der Maschinenteknik auf die Siebeigenschaften
 - Hohe Prozesstransparenz und Einsatz der notwendigen Messtechnik
-

Nutzen von Pilotversuchen für eine Optimierung

Stellt sich nach der Bewertung des Entwässerungsverlaufes und der erreichten Trockengehalte nach dem Sieb ein Potenzial an der konkreten Papiermaschine heraus, kann eine Optimierung an Versuchspapiermaschinen erfolgen.

Ist eine Optimierung des Siebeinsatzes für eine Papiermaschine notwendig, werden in Zusammenarbeit mit dem Sieblieferanten alternative Siebdesigns ausgewählt. Ein Wechsel des Siebdesigns kann jedoch zu erheblichen Problemen im Produktionsprozess führen. Es ist sinnvoll, das Sieb bereits im Vorfeld auf einer schnell laufenden Versuchspapiermaschine zu testen.

Durch eine Optimierung der Entwässerung an schnell laufenden Versuchspapiermaschinen können Einflüsse alternativer Siebe auf den Entwässerungsverlauf, die erreichten Trockengehalte, Retention und Entwässerung untersucht werden.

Empfehlungen für das Vorgehen bei Pilotversuchen zur Optimierung der Entwässerung

Die Versuche sollten an schnell laufenden Versuchspapiermaschinen erfolgen. Langsam laufende Pilotpapiermaschinen und Laborversuche sind für eine unmittelbare Übertragung von Erkenntnissen in die Praxis weniger geeignet.

Dazu werden das aktuell eingesetzte Sieb und das alternative Siebdesign bei gleichem Abstand der Wasserlinie miteinander verglichen. Das gleiche Stoff- und Retentionssystem wie an der Papiermaschine muss eingesetzt werden.

Die in die Praxis rückführbaren Ergebnisse sind die erzielte Retention und Formation bei gleichem Abstand der Wasserlinie. Diese Werte sind für die spezielle Produktion hinsichtlich ihrer Priorität miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus kann der Einfluss der Maschineneinstellungen (Maschinengeschwindigkeit, Entwässerungsverlauf) praxisnah untersucht und in die Praxis zurückgetragen werden.

**Potenzial
besserer Mess-
und Regeltechnik**

Eine Bewertung der Entwässerung sollte verschiedene Sorten und Betriebssituationen abdecken und beruht daher vorzugsweise auf kontinuierlichen Messungen der Entwässerungsmengen (Volumenstrom Siebwasser) oder der Trockengehalte des Faservlieses auf und nach dem Sieb.

In der Praxis wird das aktuelle Entwässerungsverhalten vom Maschinenpersonal dennoch zumindest halbquantitativ wahrgenommen, indem Hilfsgrößen betrachtet werden, wie Abstand der Wasserlinie, Energieverbrauch in der Trocknung und Feuchtegehalt im Papier. Die Bewertung ist zwangsläufig subjektiv und wird in aller Regel nicht dokumentiert.

Eine kontinuierliche Messung der Entwässerungsmengen erhöht die Prozesstransparenz und bietet Ansatzpunkte zur Optimierung. Darüber hinaus kann schnell auf Schwankungen im Entwässerungsverhalten der Faserstoffzusammensetzung reagiert werden.

10 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

**Optimierung der
Wechselwirkungen
zwischen
Nasssieb, Flocke
und Füllstoffen**

Es wurden Verfahrenskonzepte und Strategien zur Optimierung der Entwässerung durch die systematische Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Nasssieben, Faserflocken und Füllstoffen an realen Papiermaschinen und durch Nachstellen einzelner Systemparameter (Retention und Entwässerung) erarbeitet.

Im Labor zeigte sich im direkten Vergleich der Retentionsmittel mit PAM (hohe Molmasse und geringe Ladungsdichte) eine stärkere Flockung, höhere Retention und höhere Entwässerungsleistung im Vergleich zu PEI (geringe Molmasse und hohe Ladungsdichte). Der Retentionsmitteleinsatz ist entscheidend für die Optimierung der Retention, Entwässerung und Formation. Bei gleichen Flockeneigenschaften (gleichem Retentionsmitteleinsatz) konnte der Einfluss der Siebe durch eine mit steigendem FSI einhergehende steigende Retention beobachtet werden. Möglichkeiten und Grenzen der Laborversuche konnten ermittelt werden.

Optimale Kombination zwischen Siebdesign und Additiveinsatz

Im Rahmen des Vorhabens sollte die optimale Abstimmung zwischen Retentionssystem und Sieb ermittelt werden.

Angangsthese des Forschungsvorhabens war das Vorhandensein von Wechselwirkungen zwischen Suspensions- und Nasssieb-Eigenschaften im Hinblick auf die Entwässerung. Eine Wechselwirkung bedeutet, dass eine unabhängige Optimierung der Einflussbereiche nur begrenzt zielführend wäre.

Die These konnte auf Basis der Erkenntnisse aus Versuchen im Labor- und Pilotmaßstab nicht bestätigt werden. Siebtyp und Retentionssystem können unabhängig voneinander betrachtet und ausgewählt werden.

Die Aussagesicherheit reicht soweit wie die Nachweismöglichkeiten der derzeit verfügbaren Untersuchungsmethoden. In jedem Fall darf gefolgert werden, dass solche Wechselwirkungen eine untergeordnete Rolle spielen. Gegenüber den Wechselwirkungen sind die Einzelwirkungen der Suspensions- und Siebeigenschaften als deutlich vorrangig einzustufen.

Datenaufnahme in Papierfabriken

Bei der Analyse vorhandener Installationen wurden erhebliche Unterschiede in der Performance von Retention und Entwässerung aufgedeckt. Vorgefundene Abweichungen vom Stand der Technik weisen auf ein deutliches Optimierungspotenzial hin. Messeinrichtungen zur Beschreibung der Entwässerung sind kaum installiert. Für eine sortenspezifische oder weitergehend dynamische Erfassung der Einflüsse und eine darauf aufbauende Optimierung sind solche Messeinrichtungen Voraussetzung.

Verbesserung der Entwässerung

Bei den Pilotversuchen führte ein flaches Entwässerungsprofil – also eine moderate Entwässerung zu Beginn der Entwässerungsstrecke – in der Folge zu einem höheren Trockengehalt sowie zu geringeren mittleren Flockengrößen nach dem Sieb und letztendlich zu einer besseren Formation. Die Vorgänge zu Beginn der Entwässerungsstrecke haben eine hohe Bedeutung für die Konsistenz des Faservlieses, den Verlauf der Entwässerung und damit auch für Retention, Trockengehalte und Papierstruktureigenschaften. Eine initial ungünstig ausgebildete Blattstruktur ist im weiteren Prozess kaum ausgleichbar. Eine optimale Retention, Entwässerung und Formation kann durch Anpassung der Maschineneinstellungen auf das aktuelle Retentions- und Stoffsystem in Verbindung mit dem eingesetzten Sieb erreicht werden.

Die Einstellung des Entwässerungsprofils stellt damit einen Freiheitsgrad dar, der verstärkt zur gezielten Optimierung von Retention, Entwässerung und Formation genutzt werden sollte.

Eine Verbesserung der Entwässerung ist hierbei nicht in einer Erhöhung der lokalen Entwässerungsleistung, sondern in der Verbesserung des gesamten Entwässerungsverlaufes und dem daraus resultierenden Trockengehalt nach dem Sieb zu sehen. Erst ein hoher Trockengehalt nach dem Sieb bietet ein für den Anlagenbetreiber nutzbares Potenzial zur Reduzierung der Energiekosten in der Trocknung.

Aussagekraft der Labor- und Pilot-ebene

Der Labormaßstab eröffnet die Möglichkeit, Siebeigenschaften breit zu variieren und ein systematisches Versuchsprogramm in kurzer Zeit abzudecken. Verfügbare statische Labormethoden lösen Entwässerungsunterschiede jedoch nicht ausreichend auf. Insbesondere die initiale Entwässerung kann nicht untersucht werden.

Die im Projekt geprüfte Bewertung von Sieben an einer schnell laufenden Konstantteil-Versuchsanlage ermöglicht die praxisgerechte Bewertung von Retention, Entwässerung und Formation und geht damit weit über die Möglichkeiten des vorhandenen Kennwertsystems (FSI, DI, Luftdurchlässigkeit) hinaus. Papierfabriken können das für sie relevante Stoffsystem einsetzen. Weitergehend können Entwässerungsregime für ein ausgewähltes Sieb geprüft, verstanden und optimiert werden. Dies ist auch mit neu entwickelten Nasssieben möglich.

Die Kenntnis der Zusammenhänge am Sieb ist für den Anlagenbetreiber wichtig, um den Entwässerungsverlauf richtig einstellen zu können. Solch eine Prozesstransparenz ist insbesondere dann Voraussetzung für eine optimale Fahrweise, wenn ein breites Sortenprogramm produziert wird und Entwässerungsmesswerte nicht verfügbar sind.

Fachübergreifende Thematik

Eine bisher unbearbeitete Aufgabenstellung im Schnittstellenbereich von Materialwissenschaften, Textilherstellung, Papierverfahrenstechnik und Papierchemie wurde bearbeitet. Die Thematik stieß bereits während der Laufzeit des Forschungsvorhabens auf großes Interesse und führte im Projektbegleitenden Ausschuss und bei weiteren Industriekontakten zu intensiver Diskussion mit den Vertretern der beteiligten Industriezweige.

Ansprechpartner für weitere Informationen:

Dipl.-Ing. C. Mannert
Tel. 089/12146-192
christian.mannert@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
www.ptspaper.de

Literatur

- 1 Johnson D.B.;
Retention and drainage of forming fabrics;
Pulp & Paper Canada 85:6, 167-171 (1984)
- 2 Johnson D.B.;
Retention and drainage of multi-layer fabrics;
Pulp & Paper Canada 87:5, 185-188 (1986)
- 3 Beran R.L.;
The evaluation and selection of forming fabrics;
Tappi Journal 62:4, 39-44 (1979)
- 4 Atkins J.;
The forming section: beyond the fourdriner;
Solutions 3, 28-30 (2005)
- 5 Rooks A.;
Managing retention, drainage and formation;
Solutions 87:6, 40-42 (2004)
- 6 Lee P., Rodger A.;
A forming partnership with the Smith, Anderson Group;
Paper technology 41:12, 53-57 (2000)
- 7 Danby R.;
Forming fabric design – definition and selection: the means to machine and fabric efficiency;
Pulp & Paper Canada 101:8, 222-227 (2000)
- 8 Renaud S., Olsson B.;
Wet-end chemistry – On-line dewatering measurement;
Paper Technology 40:10, 36-40 (1999)
- 9 Helmer R.J.N., Covey G.H., Raverty W.D., Vanderhoek N.;
Flow phenomena and paper forming;
Appita Journal 54:1, 54-60 (2001)
- 10 Paulapuro H.;
Papermaking Part 1, Stock preparation and wet end. Book 8;
Helsinki: FAPET (2000)
- 11 Royo M.A., Thorp B.A.;
PIMA 63:9, 38-41 (1981)
- 12 Barratte C., Roux J.-C., Voillot C., Nest J.F., Nonjon J.C., Mangin P.;
Simulation of initial fibre retention by a forming fabric;
Appita, 54:4, 364-368 (2001)
- 13 Mori Y., Nakahara T.;
Modeling of drainage and pulp mat forming at hydrofoils for a paper machine;
Measurement and control: applications for the operator;
Tampere, Finland, 6-8 June, 241-246;
Helsinki, Finland: Kopio Niini (2006)