

Modellgestützte Optimierung von Retention und Formation im Wet End von Papiererzeugungsanlagen

W. Dietz

Inhalt

Zusammenfassung	2
Abstract	3
1 Einleitung	4
1.1 Bedeutung von Retention und Formation.....	4
1.2 Einflüsse und Optimierung.....	5
1.3 Mathematische Modellierung und Optimierung.....	5
2 Forschungsziel und Vorgehen	8
3 Betriebsdatenbasis	9
3.1 Gewinnung der Datenbestände.....	9
3.2 Datenbestand.....	11
4 Korrelationsanalyse	11
4.1 Methoden	11
4.2 PM A	12
4.3 PM B	13
4.4 Diskussion.....	16
5 Modellierung der Wet-End-Parameter	17
6 Kalibrierung und Validierung von Regressions- und PLS-Modellen	17
6.1 PM A	17
6.2 PM B	20
6.3 PM B – Modellierung nach gezielter Änderungen von Einflussgrößen.....	22
6.4 Ergebnisübersicht und Diskussion	23
7 Relationen zu den Wet-End-Parametern	26
8 Modellbasierte Optimierung von Retention und Formation	27
8.1 Vorgehen	27
8.2 Zielgrößen.....	28
8.3 Prognosemodelle und Kosten der Einflussgrößen.....	30
8.4 Optimierung	31
8.5 Validität der Optimierung und Schlussfolgerungen	34
9 Schlussfolgerungen	36
Literaturverzeichnis	38

Zusammenfassung

Zielstellung	<p>Ziel des Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Produktivität von Papiermaschinen bei gleichzeitiger Sicherstellung der Produktqualität durch eine simultane mathematische Optimierung von Retention und Formation.</p> <hr/>
Modellierung	<p>An Papiermaschinen wurden Online-Daten erhoben und daraus PLS-Modelle für Retention und Formation erstellt. Die Korrelationsanalyse zeigte in den Datenbeständen aus dem Normalbetrieb der Anlagen starke Abhängigkeiten zwischen Größen, die prinzipiell unabhängig voneinander einstellbar wären. Diese Multikollinearität erschwerte eine kausale Interpretation der Korrelationen und die Identifikation und Bewertung von Einflussgrößen.</p> <p>Die erstellten Modelle wiesen insgesamt moderate bis gute Güte auf und eigneten sich dazu, wesentliche Änderungen in den Zielgrößen zu prognostizieren. Der Ansatz, Wet-End-Parameter in die Modellierung einzubeziehen, war nicht erfolgreich: Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert und kolloidale Ladung zeigten nur geringe Varianz. Die kolloidale Ladung variierte in einem Fall stärker, jedoch war auch das Messrauschen stärker. Den Parametern konnte damit kein signifikanter Einfluss auf die Zielgrößen zugeschrieben werden.</p> <hr/>
Optimierung	<p>Ein mathematisches multivariates Optimierungsvorgehen wurde erarbeitet. Für die Betriebspraxis ist eine multivariate Optimierung erst dann sinnvoll, wenn alle betroffenen relevanten Zielgrößen beachtet werden. Daher wurden neben Retention und Formation weitere Produktivitäts- und Produktqualitätsgrößen einbezogen. Modifizierte Prognosemodelle, Kostenfunktionen und Nebenbedingungen wurden der Optimierung hinterlegt. Im Optimierungsszenario wurde eine exemplarische Einsparung von 2,4 €/t Papier errechnet.</p> <hr/>
Schlussfolgerung	<p>Das Optimierungsvorgehen erlaubt erstmals, die vielschichtigen Wirkungen von Additivdosierungen, Mahlleistung, Rezepturvorgaben und Formereinstellungen auf die Zielgrößen zu quantifizieren und die Kosteneffekte transparent zu machen. Es ist weniger als alleinstehendes mathematisches Vorgehen einzustufen, sondern als wertvolle Unterstützung im Optimierungsprozess.</p> <hr/>
Danksagung	<p>Das Forschungsvorhaben IGF 14701 N 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.</p> <p>Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen der Papierindustrie für die Unterstützung der Arbeiten.</p> <hr/>

Abstract

Objectives

The research project was intended to enhance the productivity of paper machines whilst ensuring the product quality through simultaneous model-based optimisations of retention and formation.

Modelling

Paper machine online data was collected. PLS models for retention and formation were built. In the data collected during normal mill operation, a correlation analysis showed strong interdependencies between variables which are in principle independently manipulable. This multi-collinearity impeded the causal interpretation as well as identification and evaluation of influencing parameters.

The models had a moderate to good goodness of fit and lent themselves to forecasting major changes in target parameters. Considering wet end parameters for modelling was not successful: Temperature, conductivity, pH and colloidal charge showed only minor variations. Colloidal charge varied more in one of the cases, but the measuring noise was higher than, too. Hence these parameters had no significant influence on the target parameters

Optimisation

A procedure of mathematical multivariate optimisation was established. In mill practice, multivariate optimisation only makes sense if all affected relevant target parameters are taken into consideration. Besides retention and formation, further productivity and product quality parameters were therefore included as well. Adapted forecast models, cost functions and constraints were set as a basis for optimisation. In the optimised scenario exemplary savings of 2.4 €/t paper) could be achieved.

Conclusions

For the first time, this optimisation procedure allows the complex effects of additive dosages, refining, furnish composition and former settings on the target parameters to be quantified and cost effects to be analysed. It should be regarded as a valuable support in the optimisation process rather than stand-alone mathematical procedure, though.

Acknowledgement

The IGF 14701 N research project of the research association PTS was funded within the program of promoting “pre-competitive joint research (IGF)” 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 warm gratitude for this support.

We would also like to express our thanks to the involved paper mills for supporting the project performance.

1 Einleitung

1.1 Bedeutung von Retention und Formation

Retention Retention ist definiert als der Anteil der Feststoffe der Suspension, der bei der Papierherstellung auf dem Blattbildungssieb zurückgehalten wird. Die Retention ist mit einer Vielzahl von Prozesswirkungen verbunden [1]: Eine hohe Retention hält die Feinstoff- und Füllstoffbeladung des Primärkreislaufs gering. Dies vermeidet Ablagerungen und Reinigungsaufwand. Eine geringe Siebwasser-Stoffdichte entlastet den Stofffänger. Feststoffverluste mit dem Abwasser können so begrenzt und eine gute Klarwasserqualität sicher gestellt werden, was wiederum Anlagenausfälle und Reinigungsaufwand reduziert [2]. Eine hohe Retention sichert zudem die Stabilität des Wet End und erlaubt eine schnelle Reaktion auf Prozessänderungen [3]. Damit kommt der Retention eine wichtige Rolle für die Anlagenproduktivität zu.

Eine schlechte Retention kann auf der anderen Seite die Papierqualität beeinträchtigen, da eine hohe Feinstoff- und -füllstoffbeladung des Primärkreislaufs Gradienten in z-Richtung des Papiers verstärkt, also zur Zweiseitigkeit führt. Eine gute Retention ist weitergehend Voraussetzung für eine gute Leimungsmittel- oder Nassfestmittel-Effizienz.

Formation Die Formation ist eine wichtige Qualitätsgröße des Papiers. Eine gute Formation liegt vor, wenn das Papier in der Durchsicht geringe Kontraste aufweist. 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 auch im Zusammenhang mit Festigkeitseigenschaften und der Bedruckbarkeit.

Zusammenhänge Retention und Formation sind in weiten Teilen durch die gleichen Einstellgrößen des Prozesses bestimmt. Eine wesentliche Rolle spielen hier Flockungsphänomene. Eine starke Flockung bewirkt eine gute Retention, aber eine schlechte Formation. Dieses Dilemma ist Ausgangspunkt des Forschungsvorhabens.

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 [4, 5].

1.2 Einflüsse und Optimierung

Einflussgrößen Einflüsse auf Retention und Formation finden sich in den Bereichen

- Rezeptur,
- Mahlleistung,
- Art und Dosierung der chemischen Additive,
- Maschinenkonfiguration und
- Maschineneinstellungen.

Empirische Optimierung

Angesichts der zahlreichen Handlungsoptionen ist üblicher Ansatz zur Optimierung von Retention und Formation ein empirisches Vorgehen im laufenden Betrieb, teilweise unterstützt durch Betriebsversuche. Dies hat den Vorteil, dass die Ergebnisse direkt auf der Betriebsanlage getestet und bewertet werden können. Der Nachteil von Betriebsversuchen liegt darin, dass sie aus Kostengründen begrenzt sind und dass insbesondere kein Beleg möglich ist, ob der gefundene Arbeitspunkt einem (Kosten-)Optimum entspricht.

Modellbasierte Optimierung

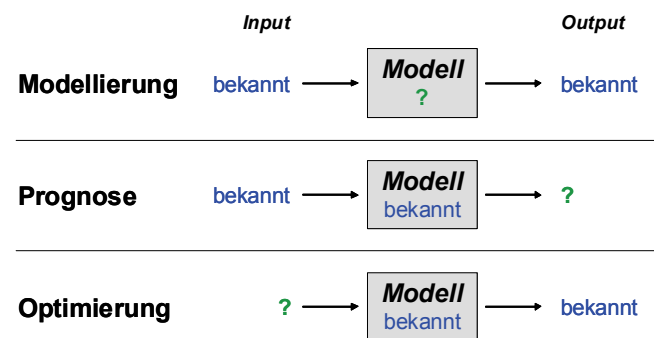
Eine modellbasierte Optimierung verspricht den optimalen Arbeitspunkt mit Sicherheit zu identifizieren. Die simultane Optimierung von Retention und Formation im Wet End ist eine multivariate Optimierungsaufgabe, die bislang noch nicht auf verallgemeinerbarer Basis gelöst wurde, aber große praktische Bedeutung für den Papierherstellungsprozess besitzt.

Benötigt werden physikalische oder datenbasierte Modelle der Zielgrößen. Solche Modelle wurden bislang für Prognosen erstellt, jedoch nicht unter dem Aspekt einer simultanen Optimierung.

1.3 Mathematische Modellierung und Optimierung

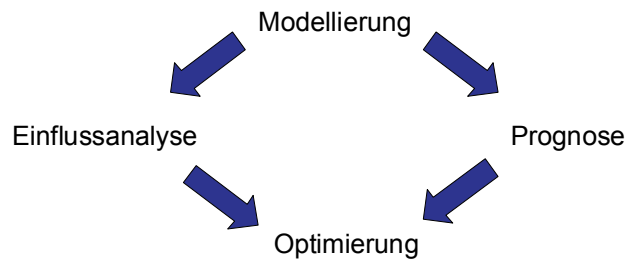
Modellierung, Prognose und Optimierung

Anhand der Vorgabe, welche Information gegeben und welche gesucht sind, lässt sich unterscheiden zwischen Modellierung, Modellanwendung zur Prognose und Modellanwendung zur Optimierung:



**Modellierung:
Zweck und Inhalte**

In anderer Darstellung führt dies auf verschiedene Einsatzmöglichkeiten der Modellierung:



Zweck der Einflussanalyse ist an erster Stelle Wissensgewinn, auch um eine empirische Optimierung zielgerichtet ausführen zu können. 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 Gewichte der einzelnen Einflussfaktoren berechnen.

Für die Prognose ist die Unabhängigkeit der Einflussgrößen nicht relevant. Maßstab ist die Prognosegüte, üblicherweise wiedergegeben durch das Bestimmtheitsmaß R^2 der Korrelation zwischen gemessenen und prognostizierten Parametern, den Modellierungsfehler RMSE (Root mean square error), gegebenenfalls den Fehler der Kreuzvalidierung (Root mean square error of cross validation) und den Validierungsfehler RMSEV bei Anwendung des Modells auf neue Datensätze (Root mean square error of validation).

Für die mathematische Optimierung sollen die Modelle sowohl nur unabhängige Inputvariable berücksichtigen als auch eine gute Modellgüte aufweisen. Die Anforderungen an solche Modelle sind damit höher als für Prognosemodelle, wie sie bisher für Retention und Formation erarbeitet wurden.

**Physikalische
Modellierung der
Retention**

Verschiedene Autoren entwickelten Retentionsmodelle auf physikalischer Basis. Shirt et al. implementierten ein theoretisches Modell der Flockung und Retention in ein Simulationsmodell [6, 7]. Die Kalibrierung basierte auf angenommenen Werten. Die Flockung wurde hier zur Retentionsprognose herangezogen. Auch Samkocwa et al. [8] verwendeten physikalische Modelle für die Retention, die Flockungsphänomene einbeziehen. Cho und Garnier [9] 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 muss bezweifelt werden, ob die Theorien der Polymer-Adsorption und Flockung reale Stoffsysteme so genau abbilden können, dass Prognosen im konkreten Anwendungsfall möglich werden.

Datenbasierte Modellierung der Retention

Daher entwickelten einige Autoren datenbasierte Modelle der Retention. Donat et al. [10] modellierten die Feinstoffretention linear als Funktion von Additivdosierungen mit Versuchsdaten an einer Feinpapiermaschine. Cho et al. [11] 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. Sie merkten an, dass die Wirkung des Retentionspolymers nichtlinear ist und dass weitere Inputvariablen einbezogen werden könnten.

Huber et al. [12] verglichen den Einfluss von Retentionssystemen bei verschiedenen Scherraten auf die Balance zwischen Füllstoffretention und Flockung an einem Pilotversuchsstand. Anhand von polynomischen Modellen zweiten Grades und deren Darstellung als Graphen wurden Optimalpunkte identifiziert. Methodisch ist dies ein erster Ansatz zur modellbasierten Optimierung von Retention und Formation.

Physikalische Modellierung der Formation

Physikalische Modellierungsansätze für die Formation beziehen sich auf die Stoffflockung als Vorstufe der Formationsausprägung [13, 14]. Diese Betrachtung ist dann durch ein zweites Modell zu den Einflüssen der Maschineneinstellungen ab Stoffauflauf zu ergänzen [15]. Cho et al. [16] modellierten die Formation direkt als eine Funktion des Crowding-Faktor, Bindungsstärke zwischen einzelnen Fasern, Füllstoffretention und Füllstoffanteil im Stoffauflauf. Das hinterlegte Modell ist insofern unvollständig, als die Einflüsse der Maschineneinstellungen nicht betrachtet werden.

Physikalische Modellierung der Formation

Einen datenbasierten Weg gingen Yli-Fossi et al. [17]. 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. [18] nutzten Neuronale Netze. Ihr Modell verwendete 32 Inputs. Es wurde als Softsensor an einer Papiermaschine implementiert, um Formationswerte früher als durch Labormessungen bereitzustellen.

Modellbasierte Optimierung

Bei der modellbasierten Optimierung werden auf der Basis von Modellen für die Einstellgrößen (Input-Variablen) optimale Werte derart ermittelt, dass die Zielgrößen spezifizierten Wertebereiche einhalten. Optimierungsverfahren benutzen die Minimierung einer geeigneten Zielfunktion (Kostenfunktion), mit der auch die Güte der gefundenen Lösungen bewertet werden kann.

Eine multivariate (simultane) mathematische Optimierung von Retention und Formation wird mit diesem Forschungsbericht erstmalig vorgestellt.

2 Forschungsziel und Vorgehen

Ziel Ziel des Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Produktivität von Papiermaschinen bei gleichzeitiger Sicherstellung der Produktqualität durch eine simultane mathematische Optimierung von Retention und Formation auf der Basis von Retentions- und Formationsmodellen, die mit Online-Daten kalibrierbar sind. Damit soll eine optimale Balance zwischen den Zielgrößen erreichbar werden. Die Rolle von Wet-End-Parametern (Messgrößen für Stoff und Siebwasser) als Indikatoren für den aktuellen Wet-End-Zustand wurde hierzu untersucht. Ein modellbasiertes Optimierungsvorgehen wurde getestet, um Vorgaben für die optimale Einstellung von Additivdosierungen und anderen Prozessgrößen abzuleiten.

Gesamtvorgehen Im Forschungsvorhaben wurde wie folgt schrittweise vorgegangen:

Betriebsdatenbasis	Als Datenbasis der Untersuchungen wurden Produktionsdaten von Papiermaschinen erhoben und Zeitreihendaten (Onlinedaten) aufgezeichnet. Dieser Daten wurden einer Datenvorverarbeitung unterzogen.
Korrelationsanalyse	In der Korrelationsanalyse wurden die Datenbestände auf innere Zusammenhänge geprüft und Aussagen zur Unabhängigkeit von Einflussgrößen abgeleitet.
Modellierung der Wet-End-Parameter	Abhängigkeiten der Wet-End-Parameter wurden durch Modellierung untersucht.
Modellierung von Retention und Formation	Retention und Formationswerte wurden modelliert, um zum einen relevante Einflussgrößen zu identifizieren und in ihrer Einflussstärke zu bewerten, und um zum anderen Prognosemodelle für die simultane Optimierung vorzubereiten.
Relationen zu den Wet-End-Parametern	Die Aussagekraft von Wet-End-Parametern für die Modellierung von Retention und Formation wurde bewertet.
Modellbasierte simultane Optimierung	Eine simultane Optimierung unter Einbeziehung weiterer Prozess- und Produkt-Zielgrößen wurde erprobt.

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

	PM A	PM B
Rohstoffe	Langfaser-, Kurzfaserzellostoff, holzhaltiger Faserrohstoff in geringen Mengen	Langfaser-, Kurzfaserzellostoff
Siebpartie	Verdünnungsstoffauflauf; Hybridformer	Hybridformer
Retentions-system	Nanopartikelsystem (Polyacrylamid/Kieselsol)	Nanopartikelsystem (kationische Stärke/Nanopartikel)

3 Betriebsdatenbasis

3.1 Gewinnung der Datenbestände

Produktionsdaten	Als Grundlagen der weiteren Arbeiten wurden die Maschinenkonstellation, ein Fließschema der Produktion, Volumina im Konstantteil, Additivtypen und -dosierorte, typische Sortenfolgen und sonstige Betriebsweisen sowie In- und Outputs wichtiger Regelkreise erfasst.
Variablen-Vorauswahl	Für die Datenaufnahme wurden eingangs eine breite Auswahl möglicher mit Retention und Formation in Zusammenhang stehende Größen festgelegt, einschließlich Rezepturdaten (Zellstoff, Ausschuss, Füllstoff), Mahlenergien, Additivdosierungen, Stoffauflauf- und Siebpartieeinstellungen, Volumenströme, Produktionsdaten und Qualitätsdaten.
Sensoren an PM A	Eine Retentions- und Ascheretentionsmessung sowie ein Laserformations-sensor (Epair1D, Techpap, Frankreich) waren an PM A vorhanden; ebenso ein Online-Titrator für kolloidale Ladung. Zusätzliche Sensoren für Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit einschließlich Logger wurden im Siebwasser installiert (IQ Sensor Net System 2020 XT, WTW Weilheim). Eine Entwässerungsmessung stand nicht zur Verfügung.
Sensoren an PM B	<p>An PM B wurde ein Laser-Formationssensor installiert (FMS 850, Vacutec Messtechnik), der eine differenzierte Bewertung der Formation erlaubt. Der ermittelte Formationsparameter F_a steht für den Kontrast. Er gibt die mittlere lineare Abweichung des Profils vom Mittelwert wieder. Der Parameter F_{wi} ist ein Wolkigkeitsmaß und gibt die mittlere Größe dunkler Bereiche wieder.</p> <p>Die Retentionsmessung erfolgte über eine installierte Trübungssonde, mit der die Gesamtretention, jedoch keine Ascheretention erfasst werden konnte. Eine Ladungsmessung wurde für das Siebwasser installiert (PCT 20, BTG Instruments).</p> <p>Als Maß für die Entwässerung war an PM B die Extraktionswassermenge vom Obersieb verfügbar. Diese gibt jedoch die Entwässerungsleistung nicht direkt wieder – sie steigt an, wenn in der Initialzone des Siebes weniger entwässert wird. Die Daten wurden modelliert, waren jedoch nicht sicher interpretierbar. Auf eine Diskussion der Ergebnisse wird verzichtet.</p>

Gewinnung von Online-Daten

An PM A waren die Parameter auf zwei Prozessleitsysteme aufgeteilt. Aus einem davon war kein Datenexport möglich. Diese Parameter wurden daher aus der Feldbus-Ebene mit Hilfe einer TCP/IP-Verbindung ausgelesen. Insgesamt waren sechs Datenquellen auszulesen: Das neuere Prozessleitsystem, die Feldbusebene, die Messrahmen-Qualitätsdaten, das Retentionsmesssystem, der Flockungsmesssystem sowie der Temperatur/pH/Leitfähigkeit-Logger.

An PM B konnten die vorausgewählten Parameter über das Prozessleitsystem auf verschiedenen Servern aufgezeichnet und exportiert werden. Ergänzend waren Mahlgradmessungen als Listen verfügbar.

Soweit verfügbar, wurden alle Werte in 1 min-Intervallen exportiert.

Datenvorverarbeitung

Zur Datenvorverarbeitung wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Formatierung in einheitliche Tabellenformate (Excel)
 - Zeitkorrektur von unterschiedlichen Systemuhren und Systemzeiten (MEZ, MESZ, UTC)
 - Zeitliche Verschiebung von Parameterdaten zum Ausgleich von Transferzeiten des Prozesses. Transferzeiten wurden physikalisch aus Volumenströmen und Volumina der Prozesselemente berechnet.
 - Entfernung invalider Messwerte durch Min-Max-Blenden
 - Entfernung unplausibler Messwerte nach Durchsicht aller Trendkurven (z. B. Spike-artige Ausreißer)
 - Rasterung in ein einheitliches Zeitraster mit 3 min-Intervall: Mittelwertbildung für Parameter mit mehr als zwei Messungen pro Intervall, Interpolation für andere Parameter
 - Zuordnung von tambourbezogenen Werten zum Zeitraster
 - Markierung nicht repräsentativer Zeitbereiche durch eine Zusatzvariable "ungültig": Zeiten von 3 min vor bis 18 min (PM A) bzw. 30 min (PM B) nach Abrissen und Stillständen, Zeiten mit einer Maschinengeschwindigkeit unter 60 % des Normalwertes, Zeiten nach starken Änderungen (manuelle Prüfung).
 - Elimination von fehlerhaft gemessenen, konstanten oder vollständig mit anderen korrelierenden Variablen.
 - Berechnung von weiteren Variablen wie Rezepturanteile, Mahlenergieeinträge und Additivdosierung (Handelsware) spezifisch auf Produktionsmenge, Strahl-Sieb-Verhältnis. Massen- und Energieeinträge wurden als spezifische Werte eingesetzt.
-

3.2 Datenbestand

PM A An PM A wurden ca. 70 Parameter über 5 ½ Wochen erfasst. Nach der Datenvorverarbeitung standen 16.000 Datensätze mit 37 Input- und Outputvariable zur Verfügung.

Parameterliste PM A

Folgende Parameter gingen in die weitere Auswertung ein:

V	m/min	Maschinengeschwindigkeit	Stärke	t/t	Dosierung Stärke
FM	g/m ²	Flächenmasse	SD_Stoff_zu_PM	%	Stoffdichte nach Masch.bütte
Asche	%	Aschegehalt im Papier	Dickstoff	t/h	Stoffstrom nach Masch.bütte
Formation		Formationsindex Epair1D	Gesamt_m_StAfi	l/min	Volumenstrom zu Stoffauflauf
KF	l/t	Anteil Kurzfaser	Dünnstoff	l/min	Dosierung Stärke
LF	t/t	Anteil Langfaser	Lippe	mm	Lippenöffnung
HS	l/t	Anteil holzh. Faserrohstoff	Ladung_gAS	ueq/l	Ladung gestr. Ausschuss
gsAS	l/t	Anteil gestrichener Ausschuss	Ladung_MiB	ueq/l	Ladung Mischbütte
ugAS	t/t	Anteil ungestr. Ausschuss	Ladung_SW 1	ueq/l	Ladung Siebwasser
Asche_gsAS	kg/t	Aschestrom gestr. Ausschuss	Lf	mS/cm	Leitfähigkeit Siebwasser
Mahlstg_KF	kW	Mahlleistung Kurzfaserstrang	Luftgehalt	%	Luftgehalt Stoffauflauf
Mahlstg_LF	kW	Mahlleistung Langfaserstrang	pH		pH-Wert Siebwasser
MahlstgSumme	kWh/t	Mahlleistung gesamt	T	°C	Temperatur Siebwasser
Füllst	l/t	Füllstoffdosierung	HIC	g/l	Stoffdichte Stoffauflauf
Retm1	l/t	Dosierung Retentionspolymer	HIC_Asche	g/l	Aschegehalt Stoffauflauf
Retm2	l/t	Dosierung Nanopartikel	LIC	g/l	Stoffdichte Siebwasser
Retm 1 zu 2		Verhältnis Ret.polymer/Nanop.	LIC_Asche	g/l	Aschegehalt Siebwasser
Entschäumer	t/t	Dosierung Entschäumer	Ret	%	Retention
Leim	t/t	Dosierung Leimungsmittel	ARet	%	Ascheretention

PM B

An PM B wurden ca. 70 Parameter über 6 ½ Wochen erfasst. Nach der Datenvorverarbeitung lagen 18.000 Datensätze mit 25 Input- und Outputvariablen vor.

Parameterliste PM B

Zellstoff1	%	Anteil Zellstoff 1	NP	l/t	Dosierung Nanopartikel
Zellstoff2	%	Anteil Zellstoff 2	Stärke_ZS	l/t	Dosierung Stärke Zellstoff
Füllstoff	%	Dosierung Füllstoff	Stärke_Dünnstg	l/t	Dosierung Stärke Konstantteil
SR	°SR	Mahlgrad (SR-Wert)	PAC	l/t	Dosierung Fixiermittel
ugAS	%	Anteil ungestr. Ausschuss	WasserObersieb	l/min	Extraktionswasser Obersieb
gsAS	%	Anteil gestrichener Ausschuss	Form_Fa		Formationsindex Fa
Lippe	mm	Lippenöffnung	Form_Fwi		Formationsindex Fwi
Dichte_Stoffw	g/l	Stoffdichte Stoffauflauf	Feuchte	%	Feuchte Papier
Dichte_SW	g/l	Stoffdichte Siebwasser	FM	RE	Flächenmasse
Ladungsdichte	ueq/l	Ladung Siebwasser	Asche	%	Aschegehalt Papier
Ret	%	Retention	Geschwindigkeit	m/min	Maschinengeschwindigkeit

4 Korrelationsanalyse

4.1 Methoden

Korrelationsanalyse Zur Untersuchung gegenseitiger Abhängigkeiten aller In- und Outputvariable wurden Pearson-Korrelationskoeffizienten berechnet und als Matrix dargestellt. Die Richtung und Stärke der Regressionskoeffizienten wurde durch farbliche Hinterlegung der Tabellenzellen verdeutlicht.

Modellbildung

Zur Modellierung der Zielgrößen wurde die PLS-(partial least squares-)Methode mit dem SIMPLS-Algorithmus eingesetzt [19]. Die Anzahl an Latenten Variablen wurde jeweils so gewählt, dass der Kreuzvalidierungsfehler RMSECV minimiert wurde. Ausgehend von einem Anfangssatz von Inputvariablen wurden die herausgenommen, die keinen positiven Einfluss auf die Modellgüte (abgedeckte Outputvarianz, entspricht R^2) haben. Anhand der Residuen wurden einzelne Datensätze gegebenenfalls als Ausreißer identifiziert und aus der Modellierung herausgenommen.

Da der Schwerpunkt der Modellierung auf der Bewertung von Einflussgrößen lag, wurde eine Kreuzvalidierung durchgeführt, jedoch keine Validierung mit weiteren Test-Daten. Die Kreuzvalidierung erfolgte nach Aufteilung in zehn zusammenhängende Datenblöcke.

Als Software genutzt wurde die PLS-Toolbox (Eigenvector Research, Washington, USA) mit Matlab (The Mathworks, Massachusetts, USA).

4.2 PM A

Korrelationsmatrix

Die folgende Tabelle zeigt Ausschnitte aus der Korrelationsmatrix von PM A. Nur Korrelationskoeffizienten mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 5 % sind dargestellt.

	Prod	V	FM	Asche	Formation	Retm1	Retm2	HS	ugAS	gsAS	Füllst	Mahlstg_KF	MahlstgSumme	Lippe	Fl	pH	Ret	ARet
Prod	1	-0,20	0,94	0,78	0,25	0,40	0,16	-0,89		0,85	-0,19	0,34	-0,72	0,53	0,62	-0,42	0,15	0,66
V	-0,20	1	-0,52	-0,31	0,26	0,04	0,23	0,31	-0,26	-0,41	0,17	0,27	0,37	-0,69	-0,25	0,51	-0,19	-0,41
FM	0,94	-0,52	1	0,78	0,13	0,34	0,07	-0,88	0,09	0,89	-0,23	0,20	-0,75	0,70	0,63	-0,55	0,20	0,72
Asche	0,78	-0,31	0,78	1	0,23	0,34	0,10	-0,71	0,06	0,71	-0,02	0,14	-0,63	0,58	0,49	-0,41	0,16	0,55
Formation	0,25	0,26	0,13	0,23	1	0,41	0,35	-0,24	0,11	0,19	-0,03	0,05	-0,19	-0,07	0,44		0,20	0,24
Retm1	0,40	0,04	0,34	0,34	0,41	1	0,77	-0,30	0,16	0,42	-0,23	0,12	-0,30	0,18	0,46	-0,28	0,09	0,21
LF	-0,44	0,43	-0,53	-0,42	0,22	-0,19	-0,09	0,38	-0,10	-0,39	0,11	0,14	0,53	-0,38	-0,18	0,49	-0,10	-0,32
KF	0,29	0,15	0,20	0,17		-0,06	-0,15	-0,32	-0,79	0,22	0,18	0,74	0,27	0,03	0,32		0,32	0,28
HS	-0,89	0,31	-0,88	-0,71	-0,24	-0,30	-0,04	1	-0,09	-0,85	0,32	-0,24	0,69	-0,54	-0,58	0,43	-0,12	-0,66
ugAS		-0,26	0,09	0,06	0,11	0,16	0,13	-0,09	1	0,12	-0,37	-0,63	-0,48	0,16	-0,09	-0,17	-0,28	
gsAS	0,85	-0,41	0,89	0,71	0,19	0,42	0,13	-0,85	0,12	1	-0,43	0,12	-0,73	0,59	0,53	-0,57	0,09	0,64
Mahlstg_KF	0,34	0,27	0,20	0,14	0,05	0,12	0,02	-0,24	-0,63	0,12	0,24	1	0,40	0,07	0,36	0,19	0,25	0,19
MahlstgSumme	-0,72	0,37	-0,75	-0,63	-0,19	-0,30	-0,14	0,69	-0,48	-0,73	0,36	0,40	1	-0,45	-0,32	0,53	0,06	-0,48
Lippe	0,53	-0,69	0,70	0,58	-0,07	0,18		-0,54	0,16	0,59	-0,12	0,07	-0,45	1	0,28	-0,42		0,48
Fl	0,62	-0,25	0,63	0,49	0,44	0,46	0,17	-0,58	-0,09	0,53	-0,03	0,36	-0,32	0,28	1	-0,21	0,71	0,73

Korrelationen von Produktions- und Rezepturgrößen

- Flächenbezogene Masse und Produktionsmenge (Prod) korrelieren deutlich positiv. Die Geschwindigkeit (V) ist bei höherer Flächenmasse niedriger.
- Rezepturenbedingt wird an dieser Papiermaschine holzhaltiger Faserrohstoff (HS) nur bei niedrigen Flächenmassen (FM) eingesetzt. Bei hohen Flächenmassen wird dagegen mehr gestrichener Ausschuss (gsAS) verarbeitet.
- Bei hoher Flächenmasse wird weniger gemahlen (MahlstgSumme).
- Die Korrelation von Produktionsmenge (Prod) und Füllstoffgehalt im Papier (Asche) ist nicht prozesstechnisch bedingt. Spezifika der Sortenrezepturen sind wiederum die Ursache.
- Wird mehr ungestrichener Ausschuss (ugAS) verarbeitet, wird dafür der Kurzfaserteil (KF) abgesenkt.

Korrelationen der Zielgrößen

Die Retention (Ret) korreliert kaum mit der Ascheretention (ARet). In der späteren Modellbildung wurden Ausreißerdaten eliminiert; dies ist im Datensatz, der der Korrelationsmatrix hinterlegt ist, nicht eingearbeitet. Dies kann anteilig die Ursache sein. Die Ascheretention korreliert erwartungsgemäß mit der Flächenmasse.

4.3 PM B

Korrelationsmatrix

Auch im Datenbestand von PM B zeigten sich starke paarweise Korrelationen innerhalb der Parameter:

	Form_100Ra	Form_Fwi	Ret	WasserObersieb	Porosität	FM	Asche	Geschwindigkeit	Füllstoff	Zellstoff1	SR	ugAS	gsAS	Lippe	Ladungsdichte	NP	Stärke_ZS
Form_100Ra	1,00																
Form_Fwi	0,68	1,00															
Ret	-0,47	-0,43	1,00														
WasserObersieb	-0,11	0,40	-0,22	1,00													
Porosität	-0,12	0,06	-0,44	0,29	1,00												
FM	0,06	-0,37	-0,15	-0,62	0,32	1,00											
Asche	0,04	-0,13	-0,36	-0,21	0,71	0,78	1,00										
Geschwindigkeit	0,00	0,39	0,12	0,62	-0,33	-0,99	-0,79	1,00									
Füllstoff	-0,04	-0,21	-0,14	-0,20	0,32	0,33	0,43	-0,35	1,00								
Zellstoff1	-0,12	0,11	0,32	0,19	-0,48	-0,61	-0,71	0,60	-0,10	1,00							
SR	0,25	0,02	-0,07	-0,22	0,07	0,25	0,19	-0,24	-0,15	1,00							
ugAS	0,05	0,09	0,03	0,00	-0,16	-0,12	-0,16	0,11	-0,15	-0,22	-0,17	1,00					
gsAS	0,00	-0,23	0,03	-0,39	0,11	0,54	0,33	-0,54	-0,04	-0,38	0,01	-0,14	1,00				
Lippe	-0,11	-0,36	-0,09	-0,31	0,37	0,88	0,75	-0,88	0,31	-0,58	0,20	-0,10	0,47	1,00			
Ladungsdichte	-0,04	0,48	0,58	0,25	-0,55	-0,53	-0,63	0,54	-0,39	0,54	-0,23	-0,01	-0,07	-0,48	1,00		
Dichte_SW	0,39	0,43	-0,93	0,26	0,53	0,06	0,42	-0,04	0,14	-0,30	0,12	-0,08	-0,13	0,01	-0,57		
NP	-0,17	-0,12	-0,25	-0,10	0,65	0,67	0,78	-0,69	0,23	-0,51	0,09	-0,15	0,30	0,66	-0,42	1,00	
Stärke_ZS	-0,48	-0,15	0,39	-0,08	-0,10	0,08	-0,07	-0,13	-0,30	0,06	-0,12	0,05	0,29	0,21	0,35	0,24	1,00
Stärke_Dünnstoff	-0,17	-0,01	0,41	0,02	-0,56	-0,44	-0,75	0,44	-0,37	0,59	-0,22	0,11	0,04	-0,43	0,65	-0,40	0,42

Korrelationen

Dabei korreliert eine Reihe von prinzipiell unabhängig einstellbaren Größen mit der Flächenmasse. Hintergrund ist auch hier eine Anpassung der Rezeptur und weiterer Einstellungen an die Flächenmasse. So erlaubt z. B. eine höhere Flächenmasse einen höheren Aschegehalt, ohne Festigkeitswerte zu gefährden, und einen höheren Anteil an gestrichenem Ausschuss.

Die Ladung im Siebwasser korreliert mit $R=0,57$ mit der Stoffdichte im Siebwasser. Zum Teil ist dies damit zu begründen, dass das Messverfahren nicht nur kolloidale Ladungsträger, sondern auch geladene Feinpartikel erfasst.

Korrelationsmatrizen für einzelne Flächenmassen

Da eine ausreichende Zahl von Daten für einzelne enge Flächenmasse-Bereiche vorlagen, konnten separate Korrelationsanalysen durchgeführt werden. Der Einfluss der Flächenmasse ist in diesen Teildatenbeständen (Subsets) also eliminiert. Die folgende Matrix zeigt als Beispiel Korrelationen bei der Flächenmasse 131 ± 2 RE, sowie die Streuung der einzelnen Parameter als Variationskoeffizient:

FM 131	Form_100Ra	Form_Fwi	Ret	WasserObersieb	Porosität	Asche	Geschwindigkeit	Füllstoff	Zellstoff1	SR	ugAS	gsAS	Lippe	Ladungsdichte	NP	Stärke_ZS	Stärke_Dünstoff
Form_100Ra	1,00																
Form_Fwi	0,97	1,00															
Ret	-0,83	-0,85	1,00														
WasserObersieb	-0,04	0,06	0,10	1,00													
Porosität	0,14	0,17	-0,30	0,49	1,00												
Asche	0,74	0,66	-0,65	0,24	0,30	1,00											
Geschwindigkeit	0,51	0,52	-0,59	0,26	0,53	0,64	1,00										
Füllstoff	0,12	0,09	-0,17	-0,39	-0,42	0,04	-0,12	1,00									
Zellstoff1	-0,17	-0,23	0,33	-0,34	-0,58	-0,37	-0,53	0,41	1,00								
SR	0,26	0,21	-0,01	0,02	-0,17	0,10	0,15	-0,07	0,08	1,00							
ugAS	-0,07	-0,02	0,09	0,12	0,24	-0,12	-0,06	-0,33	-0,41	-0,49	1,00						
gsAS	-0,10	-0,03	-0,02	0,15	0,32	-0,09	0,31	-0,29	-0,48	-0,28	0,09	1,00					
Lippe	-0,44	-0,32	0,63	0,62	-0,11	-0,23	-0,37	-0,13	0,07	-0,13	0,11	-0,07	1,00				
Ladungsdichte	-0,09	-0,12	0,71	-0,10	-0,41	-0,48	-0,32	-0,22	0,08	0,11	0,01	0,10	0,65	1,00			
NP	-0,33	-0,28	0,33	0,00	0,03	-0,59	-0,24	-0,34	0,04	0,10	0,11	0,27	0,08	-0,05	1,00		
Stärke_ZS	-0,77	-0,65	0,70	0,07	-0,09	-0,85	-0,56	-0,12	0,24	-0,20	0,23	0,13	0,51	0,36	0,54	1,00	
Stärke_Dünstoff	-0,56	-0,45	0,46	0,02	-0,03	-0,79	-0,40	-0,22	0,18	-0,12	0,20	0,23	0,27	0,14	0,72	0,81	1,00
Variationskoeff.	18%	30%	7,8%	8,3%	10%	4,1%	3,4%	52%	6,2%	18%	58%	9,1%	5,5%	7,9%	2,9%	11%	4,0%

Übereinstimmende Korrelationen

Aus der Auswertung von drei Subsets für verschiedene Flächenmassen lassen sich folgend die Korrelationen herausgestellt, die in allen Fällen bei $|R| > 0,4$ gleichgerichtet sind. Als Zahlenwert angegeben ist dann der Mittelwert der Korrelationskoeffizienten R:

<i>FM 100, 131, 160: Mittelwert R wenn für alle R: $R > 0,4$ und gleichgerichtet</i>	Form_100Ra	Form_Fwi	Ret	WasserObersieb	Porosität	Asche	Geschwindigkeit	Füllstoff	Zellstoff1	SR	ugAS	gsAS	Lippe	Ladungsdichte	NP	Stärke_ZS	Stärke_Dünnstof
Form_100Ra																	
Form_Fwi																	
Ret																	
WasserObersieb																	
Porosität																	
Asche	0,63																
Geschwindigkeit	0,61					0,68											
Füllstoff																	
Zellstoff1																	
SR																	
ugAS																	
gsAS																	
Lippe																	
Ladungsdichte																	
NP																	
Stärke_ZS						-0,83	-0,66										
Stärke_Dünnstof	-0,51					-0,77	-0,57								0,66	0,76	

Die Korrelation mit dem Parameter Asche können als zufällig eingestuft werden, angesichts der geringen Streuungen der Aschewerte (Variationskoeffizient je bei 4 %).

An Korrelationen zwischen manipulierbaren Größen tritt noch die Gruppe Nanopartikel–Stärkedosierung im Zellstoffstrang–Stärkedosierung im Dünnstoff hervor. Es zeigt sich also auch hier noch eine Multikollinearität. Der Zusammenhang Zellstoff 1–ungestricherer Ausschuss ergibt sich zwangsläufig, da die Rezepturanteile 100% ergeben müssen.

In allen Fällen liegt eine negative Korrelation der Formationsparameter mit der Stärkedosierung im Dünnstoff vor und – etwas schwächer, nur in den Einzelwerten zu sehen – mit der Stärkedosierung im Zellstoffstrang.

Bewertung der Multikollinearität über VIF

Um das Maß der Kollinearität für einzelne Variable zu bewerten, lässt sich der Variance Inflation Factor (*VIF*) aus dem multiplen Korrelationskoeffizient R_j zwischen der Variable j und dem Rest der Variablen berechnen [20]:

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (1)$$

Für die Inputs im Gesamtdatensatz von PM B ergaben sich folgende Bestimmtheitsmaße R^2 und *VIF*-Werte:

	Füllstoff	Zellstoff1	Zellstoff2	SR	ugAS	gsAS	Lippe	NIP	Stärke_ZS	Stärke_Dünnstoff	PAC	FM	Asche
R^2	0,34	0,69	0,47	0,17	0,3	0,55	0,85	0,69	0,55	0,79	0,48	0,86	0,91
VIF	1,5	3,2	1,9	1,2	1,4	2,2	6,7	3,2	2,2	4,8	1,9	7,1	10,7

VIF-Werte deutlich über 1 (größer 5 oder größer 10) lassen auf Kollinearität schließen. Demnach liegt Kollinearität nur für wenige Variable vor. Dabei ist aber zu bedenken, dass die Bestimmtheitsmaße R^2 und die VIF-Werte neben geringer Abhängigkeit von anderen Inputs auch durch statistisches Rauschen gering sein können. Eine allgemeine Lösung für das Problem der Multikollinearität existiert nicht; letztlich ausschlaggebend ist die Güte der mit dem Datensatz erstellten Modelle.

4.4 Diskussion

Multikollinearität Einige prinzipiell unabhängig voneinander einstellbare Größen sind im Normalbetrieb gekoppelt, erscheinen im Datenbestand daher bis zu einem gewissen Maße kollinear. Dieser Effekt der Multikollinearität erschwert in der weiteren Auswertung eine Differenzierung.

Zusammenhänge An PM A lagen in erster Linie Korrelationen mit der Flächenmasse vor.

An PM B konnten durch Eliminierung der Flächenmasse als Größe, von der eine Reihe anderen Einstellgrößen abhängig ist, ein Zusammenhang zwischen Stärkedosierung und Formation aufgezeigt werden. Auf weitere Zusammenhänge geben die Korrelationsmatrizen Hinweise.

5 Modellierung der Wet-End-Parameter

Vorgehen	Die Modellierung diente zuerst der Prüfung, ob die Wet-End-Größen mit den erhobenen Daten modellierbar sind. Ausgewertet wurden Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert und kolloidale Ladung (kationischer Bedarf) im Siebwasser sowie Luftgehalt im Rücklauf des Stoffauflaufs.
Ergebnisse PM A	<p>Für Temperatur und Luftgehalt konnte ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,58 und 0,66 erzielt werden. Die anderen Modelle wiesen geringere Güte auf. Die durch Variablenselektion allein auf Basis der mathematisch ermittelten Relevanz gefundenen Inputs sind zum Teil prozesstechnisch nicht plausibel.</p> <p>Die kolloidale Ladung ließ sich durch erfasste primäre Inputs nicht beschreiben. Als vorrangige nicht erfasste Störgröße ist die schwankende Qualität des gestrichenen Trockenausschusses anzunehmen.</p>
Ergebnisse PM B	Angesichts eines hohen Rauschens des Messverfahrens Ladungstitration erschien die Modellierung der kolloidalen Ladung im Siebwasser gut möglich ($R^2 = 0,72$). Zu bedenken ist jedoch: Anteilig wird der Fein- und Füllstoffgehalt des Siebwassers mitbestimmt, für den Retention und Aschegehalt bestimmend sind. Auf diese beiden Größen nimmt die Flächenmasse Einfluss.

6 Kalibrierung und Validierung von Regressions- und PLS-Modellen

6.1 PM A

Variablenselektion nach Modellierungsergebnissen	<p>In einem ersten Modellierungsansatz wurden PLS-Modelle für Retention und Formation mit allen verfügbaren primären Inputkanälen des Datenbestands erstellt. Inputvariable mit niedrigen normalisierten Regressionskoeffizienten und gleichzeitig mit niedrigem VIP-Wert (Variable Importance in the Projection [19]) wurden aus den Modellen entfernt, bis acht bis zehn Inputs übrigblieben.</p> <p>Die nach diesem Verfahren selektierten Inputvariablen widersprachen dem Vorwissen sowie den Erfahrungen des Anlagenbetreibers. So wurde z. B. die Asche im gestrichenen Ausschuss als wichtigster Input für die Retention identifiziert. Dies ist nicht plausibel. Auch erwies sich die Modellgüte als gering.</p>
---	---

Variablenselektion nach a-priori-Wissen

Die Variablenselektion wurde daher folgend auf prozesstechnisches a-priori-Wissen gestützt. Gruppen von Inputvariablen wurden festgelegt:

A Einfluss erwartet	B dazunehmen, wenn Modell besser wird	B1 mindestens einer der Gruppe (Rezeptur)
FM Retm1 Retm2 Lippe Mahlleistung	V HS Füllst Asche_gAS	LF KF ugAS gsAS

Als Verbesserung der Modellgüte gewertet wurde ein R^2 -Anstieg von mindestens 2 %.

Retentionsmodell Das erstellte Retentionsmodell wies folgende Kennwerte auf:

	Retention		norm. Reg	VIP
R^2	0,50	V	-0,46	1,21
RMSEC	1,56	Retm1	0,21	0,62
RMSECV	1,76	Retm2	0,03	0,14
$m \pm s$	$53,7 \pm 2,87$	Füllst	0,34	1,17
Ausreißeranteil	10,7%	Mahlstg_KF	0,43	2,26
		JetWire	-0,29	0,60

norm. Reg: normierter Regressionskoeffizient

Die Retentionsmodellierung erzielte bei Elimination von rund 11% der Datenzeilen ein R^2 von 0,50. Das Modell kann die zu bestimmten Zeiträumen vorliegenden hohen Retentionswerte nicht beschreiben. Als Ursache sind Störungen der Messung anzunehmen.

Modell der Ascheretention

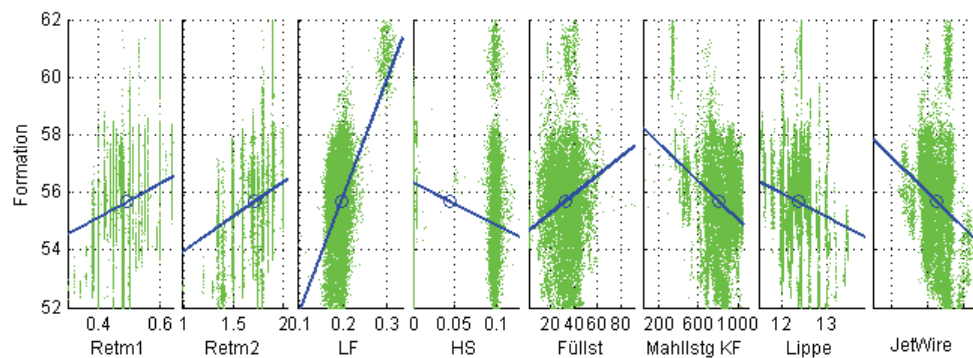
Im Ascheretentions-Modell war nur die Flächenmasse als Input notwendig.

	Formation		norm. Reg	VIP
R^2	0,65	FM	0,81	1,00
RMSEC	1,85			
RMSECV	1,98			
$m \pm s$	$19,0 \pm 4,07$			
Ausreißeranteil	5,5%			

Formationsmodell

	Formation		nom. Reg	VIP
R ²	0,67	Retm1	0,21	1,34
RMSEC	1,07	Retm2	0,21	1,44
RMSECV	1,27	LF	0,56	2,56
m±s	55,7 ± 1,94	HS	-0,40	1,03
Ausreißeranteil	0,8%	Füllst	0,19	0,15
		Mahlstg_KF	-0,30	0,99
		Lippe	-0,15	0,21
		JetWire	-0,21	0,29

Im folgenden Diagramm sind die Regressionskoeffizienten als Steigungen visualisiert. Alle anderen Inputs wurden jeweils auf Mittelwerte eingestellt. Die Punktwolken repräsentieren die Messwerte. Der x-Achsenbereich entspricht dem Min-Max-Bereich im Untersuchungszeitraum. Mit diesem – als in der Praxis möglichem Einstellbereich – macht die Auftragung deutlich, mit welchen Parametern in der Praxis welche Veränderungen erzielbar sind. Dabei ist zu beachten, dass die Extremwerte einzelner Variable nicht in allen Betriebszuständen eingestellt werden können, ohne Prozess und Produkt zu gefährden. Der Langfaseranteil zeigt die stärkste Wirkung auf die Formation.

**Nicht-linearer Einfluss von Inputvariablen**

Die Relevanz nichtlinearer Einflüsse für die Modellgüte wurde untersucht, indem die Inputvariablen einzeln durch Subtraktion oder Addition quadratischer Terme zunehmend transformiert wurden. Das PLS-Modell wurde damit neu berechnet. Es konnte so gezeigt werden, dass durch nichtlineare Transformation der Inputvariablen keine signifikanten Modellverbesserungen erzielbar sind. Eine Verwendung linearer Modelltypen erscheint gerechtfertigt, solange die Variation der Inputs nicht den Einstellbereich im verwendeten Datenbestand verlässt.

Modelle mit Subsets

Die Verlässlichkeit der ermittelten Regressionskoeffizienten wurde weitergehend untersucht, indem der Gesamtdatenbestand in drei Teile geschnitten wurde. Für diese wurden separate Modelle mit den gleichen Inputs erstellt.

Für das Retentionsmodell lag nur für die Inputs Maschinengeschwindigkeit V, Retentionspolymer Retm1, Füllstoff und Mahlleistung KF der Variationskoeffizient der jeweils drei Regressionskoeffizienten aus den Einzelmodellen unter 50 %. Dieser Wert wurde als Grenze festgelegt, bis zu der den ermittelten Werten eine quantitative Aussage zuzuschreiben ist.

Für das Formationsmodell waren die ausreichend sicher bestimmbar Inputs: Retentionspolymer Retm1, Nanopartikel Retm2, Langfaseranteil LF und Strahl-Sieb-Verhältnis JetWire. Die Variationskoeffizienten gingen mit den VIP-Werten einher: Je wichtiger eine Variable im Modell ist, desto genauer kann sie bestimmt werden

6.2 PM B**Modelle**

Nach den Erfahrungen an PM A wurde für PM B von vornherein aus technologischer Überlegung heraus ein Satz an plausiblen Inputvariablen ausgewählt. In der Modellierung wurden dann noch die Inputs herausgenommen, die nicht zur Modellgüte beitragen.

Modelle wurden für die beiden Formationskenngrößen Fa und Fwi, die Retention und die Entwässerungsmenge am Obersieb erstellt. Datenbasis waren der Gesamtdatenbestand und die Subsets für die Flächenmassen 100 ± 2 ; 131 ± 2 und 160 ± 2 RE. Für diese zeigte die Korrelationsanalyse (Kap. 4.3) ein geringeres Maß an Multikollinearität als für den Gesamtdatenbestand.

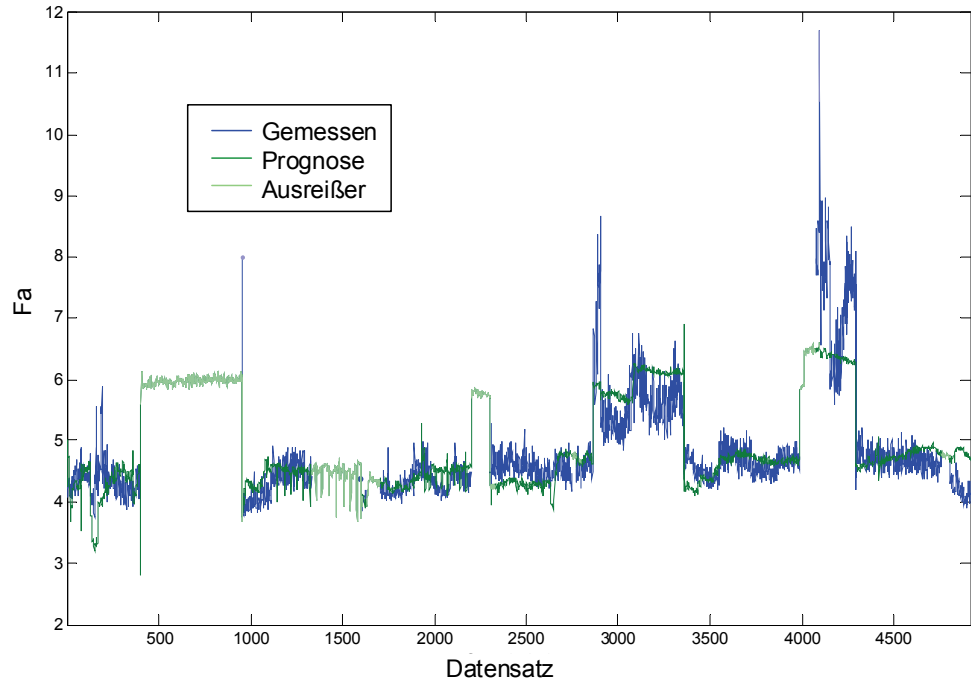
Modellgüten

Folgende Modellgüten R^2 konnten erzielt werden:

R^2	Fa	Fwi	Retention	WasserObersieb
gesamt	0,44	0,37	0,33	0,70
FM 100	0,68	0,58	0,68	0,77
FM 131	0,55	0,42	0,52	0,36
FM 160	0,69	0,33	0,52	0,48

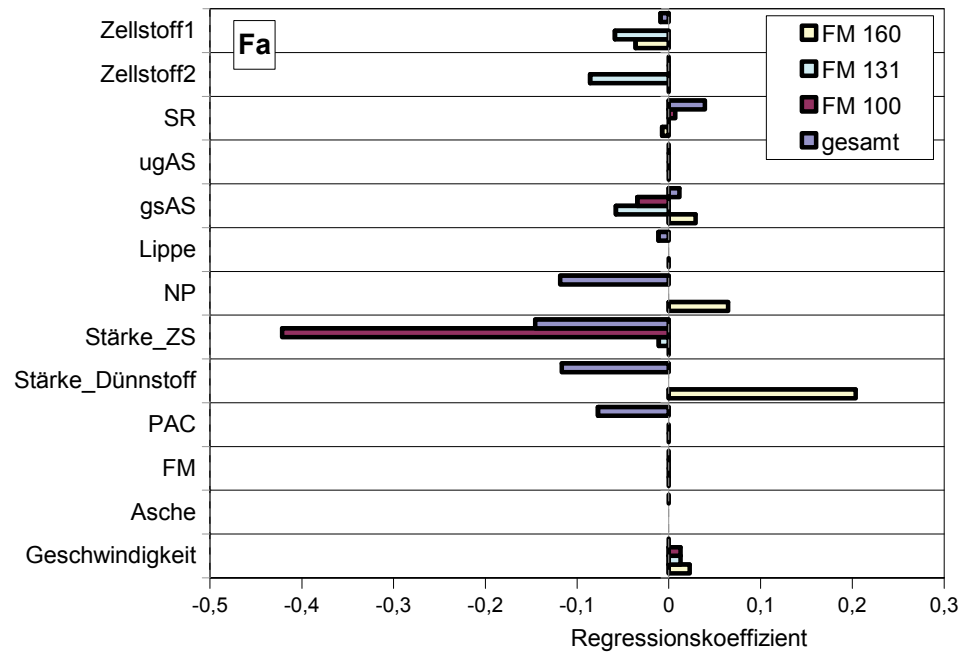
**Vergleich
Messung–
Prognose**

Die Modelle sind damit insgesamt dazu geeignet, wesentliche Änderungen wiederzugeben. Dies soll durch einen Vergleich Messwerte–Prognosewerte am Beispiel von Fa für Flächenmasse 100 dargestellt werden ($R^2 = 0,68$):



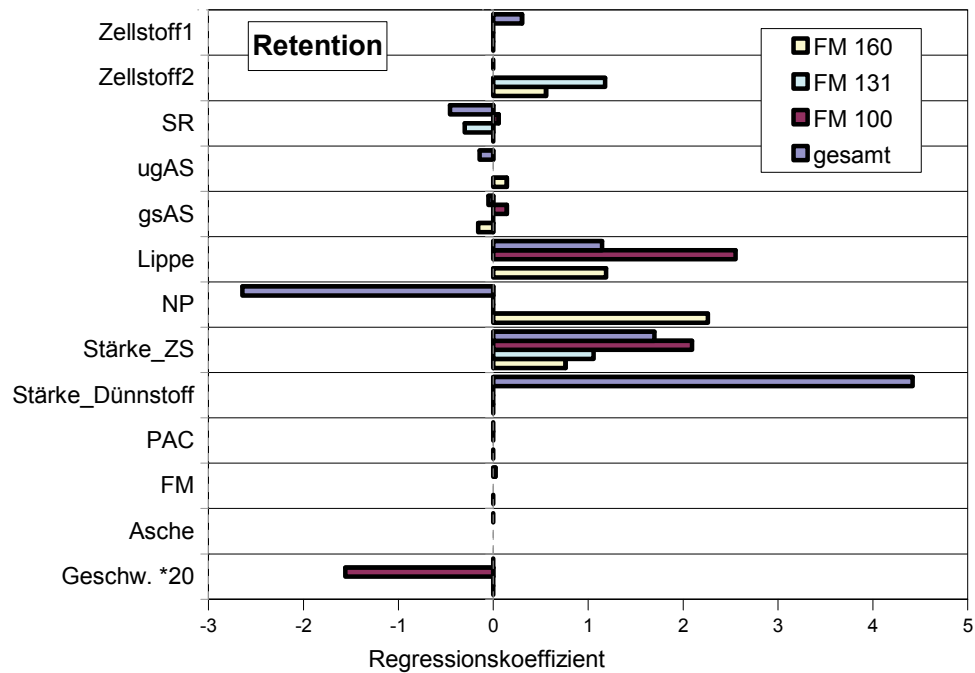
**Regressions-
koeffizienten
Formation**

Die für die Subset-Modelle gefundenen Regressionskoeffizienten differieren erheblich, hier dargestellt für Inputs der Zielgröße Formation Fa:



Regressionskoeffizienten Retention

Für die Retention ergaben sich folgende Regressionskoeffizienten:



Im Gegensatz zu der vorigen Abbildung ergaben sich für die Retention Regressionskoeffizienten in gleicher Größenordnung für den Einfluss der Lippenöffnung und der Stärkedosierung im Zellstoffstrang, mit Variationskoeffizienten von 48 % bzw. 43 %. Bei den anderen, uneinheitlichen Ergebnissen ist davon auszugehen, dass die Kollinearitäten im Datenbestand eine eindeutige Bestimmung der Regressionskoeffizienten verhindern.

6.3 Modellierung nach gezielter Änderungen von Einflussgrößen

Ansatz

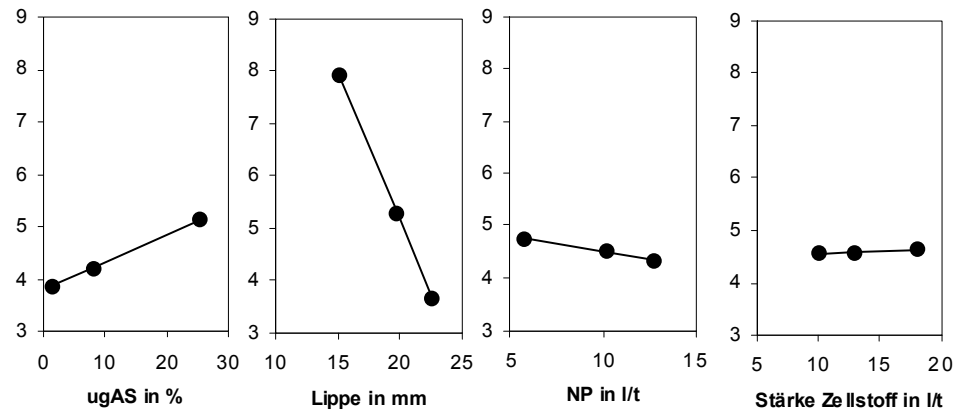
Die Modellierungen zeigten in vielen Fällen uneinheitliche Ergebnisse für die Einflussstärken der Inputvariablen. Nach den Erkenntnissen aus den Arbeiten an PM A wurden daher bei PM B gezielte Änderungen von Einflussgrößen durchgeführt. Zur Auswertung wurden paarweise Korrelationen zwischen verändertem Parameter und Zielparameter berechnet, wobei auf die Konstanz anderer Einflüsse zu achten war.

Durchgeführte Betriebsversuche

Variiert wurden zu verschiedenen Zeiten die Lippenöffnung, der Anteil an ungestrichenem Ausschuss, die Stärkedosierung im Zellstoffstrang sowie die Nanopartikeldosierung. Die Änderungen erfolgten in geringem Ausmaß, um die Produktionsstabilität nicht zu gefährden. Nicht alle Versuche waren auswertbar, da zum Teil andere Bedieneingriffe die Auswertung überlagerten. Für die Retention war keine Auswertung möglich.

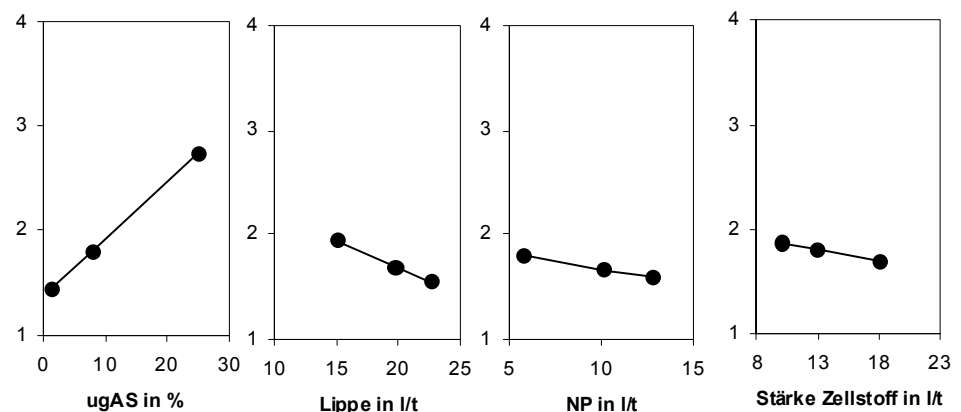
Regressionskoeffizienten für Fa

Regressionskoeffizienten (Steigungen) wurden bestimmt, aus denen sich – hochgerechnet auf übliche Einstellbereiche an der PM B – folgend dargestellte lineare Zusammenhänge für den Formationsparameter Fa ableiten ließen:



Regressionskoeffizienten für Fwi

Für den Formationsparameter Fwi ergab sich ein vergleichbares Bild:



6.4 Ergebnisübersicht und Diskussion

Modellgüte

Die Modelle wiesen insgesamt moderate bis gute Modellgüten auf und eigneten sich mit den ermittelten R^2 - und RMSECV-Werten dazu, wesentliche Änderungen in den Zielgrößen zu prognostizieren.

Alle Zielgrößen unterlagen dabei einem deutlichen Messrauschen. Je höher das Messrauschen, desto schlechter sind zwangsläufig die Kennwerte, die die Prognosefähigkeit der Modelle wiedergeben.

Übersicht Regressionskoeffizienten, PM A

Zusammenfassend wurden folgende Regressionskoeffizienten aus den Modellen für PM A mit hinreichender Genauigkeit für Formation und Retention bestimmt:

Zielgröße	Einflussgröße	Regr.koeff.	Quelle	Genauigkeit
Formation	Retm1 in kg/t	5,2	PLS-Modell Gesamtzeitraum	Variationskoeffizient bei Subsets < 50 %
	Retm2 in kg/t	2,6		
	LF in t/t	42		
	JetWire	-150		
Retention in %	V in m/min	-0,028	PLS-Modell Gesamtzeitraum	Variationskoeffizient bei Subsets < 50 %
	Retm1 in kg/t	7,0		
	Füllstoff in t/t	0,071		
	Mahlstg_KF in kW	0,0084		

Übersicht Regressionskoeffizienten, PM B

Für PM B wurden folgende Regressionskoeffizienten ermittelt:

Zielgröße	Einflussgröße	Regr.koeff.	Quelle	Genauigkeit
Fa	ugAS in %	0,053	Betriebsversuch	Werte nur aus einzelner Betriebsversuch
	Lippe in mm	-0,56		
	NP in l/t	-0,058		
	Stärke ZS in l/t	0,0091		
Fi	ugAS in %	0,055	Betriebsversuch	Werte nur aus einzelner Betriebsversuch
	Lippe in mm	-0,052		
	NP in l/t	-0,031		
	Stärke ZS in l/t	-0,022		
Retention in %	Lippe in mm	1,2	Mittelwert aus 3 o. 4 PLS-Modellen	Variationskoeffizient bei Subsets < 50 %
	Stärke ZS in l/t	1,4		

Weitere Einflüsse auf die Zielgrößen sind für beide Anlagen anzunehmen, konnten jedoch nicht in ihrer Einflussstärke bestimmt werden.

Diskussion der Einflüsse

An den Papiermaschinen wurden verschiedene Retentionssysteme eingesetzt. Eine Erhöhung der Retention durch Retentionskomponenten entspricht der Erwartung. Auch die anderen ermittelten Einflüsse und Einflussrichtungen sind insgesamt prozesstechnisch plausibel [4].

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 ließe aufgrund einer geringeren Flockung eine schlechtere Retention erwarten. Die Verbesserung der Formation mit größerer Lippe entspricht dabei der Theorie und Erfahrung.

Dazu, ob und wie das Strahl-Sieb-Verhältnis die Retention beeinflusst, wurden uneinheitliche Ergebnisse publiziert [21]. Der Zusammenhang hängt davon ab, ob mit Über- oder Unterstau gearbeitet wird, und ist ausgeprägt nichtlinear [4]. Effekte der Flockenscherung überlagern sich mit solchen der initialen Entwässerung am Sieb.

Gerli [5] änderte in Betriebsversuchen an einer Papiermaschine mit Gapformer die Mahlenergie und die Anteile an gestrichenem und ungestrichenem Ausschuss und modellierte die Formation. Diese verbesserte sich mit stärkerer Mahlung und höheren Ausschussanteilen. Dass sich bei Wechsel des Retentionssystems der Einfluss der Mahlung umdrehte, ist schwer zu interpretieren. Es lässt sich vermuten, dass die Betriebsversuche durch andere Prozessänderungen überlagert wurden. Auch aus Erfahrungen dieses Forschungsvorhabens wird deutlich, dass signifikant auswertbare Betriebsversuche in Papiererzeugungsanlagen anspruchsvoll sind.

Variablenauswahl

Auch Yli-Fossi [17] modellierte Formationswerte auf Basis von Onlinedaten aus Normalbetrieb. Die ausgewählten Inputvariablen zeigen mit den hier identifizierten kaum Überschneidungen. Sie sind schwer kausal interpretierbar, wie etwa die Stoffdichte im Ausschussbütte oder die Dosierung von Farbe. Vorausgesetzt die Korrelationsmuster innerhalb des Prozess bleiben erhalten, eignet sich solch ein Modell zur Prognose. Dies war Ziel der Arbeit und wurde belegt. Eine kausale Interpretation als Voraussetzung für eine optimierte Prozessführung erscheint allerdings nicht möglich.

Multikollinearität

Insgesamt konnten durch die Modellierung erwartete Korrelationen bestätigt werden und darüber hinaus quantifiziert werden. Durch die Multikollinearität in den Onlinedaten aus dem Normalbetrieb der Papiermaschinen war eine differenzierte Aussage bei Einflüssen mittlerer und geringer Stärke jedoch nicht möglich.

Eine Lösung für das Problem der Multikollinearität liegt in Betriebsversuchen, gegebenenfalls über einen statistischen Versuchplan. Dabei gilt: Mit stärker veränderten Betriebseinstellungen steigt zwar die Aussagekraft der späteren Modellierung, jedoch auch das Risiko von qualitätsgeminderter Produktion oder Produktionsausfällen. Die Betriebsversuche an PM B stellten in diesem Spannungsfeld einen Kompromiss dar.

7 Relationen zu den Wet-End-Parametern

Kolloidale Ladung, PM A

An PM A schwankte die kolloidale Ladung (kationischer Bedarf) im Siebwasser mit einem Wert von $-174 \pm 82 \mu\text{eq/l}$ ($m \pm s$). Sie war nur mit einem R^2 von 0,22 aus den primären Inputs modellierbar. Dabei wurden auch alle Additivdosierungen einbezogen. Als Ursachen sind zu diskutieren:

- Das Messverfahren ist methodisch bedingt weniger reproduzierbar als andere Onlinemessverfahren. Da im untersuchten Fall drei Messorte mit einem Gerät abwechselnd erfasst werden, liegt das Messintervall für einen Messort zudem nur bei 30–40 min, sodass zum einen Prozessänderungen erst zeitversetzt erfasst werden, zum anderen keine statistische Absicherung durch Mehrfachmessung möglich ist.
- Die Ladungsschwankungen resultieren aus Änderungen in der Rohstoffqualität, die nicht quantitativ erfasst wurden. In erster Linie relevant ist hier der gestrichene Ausschuss [22, 23]. Ein Korrelationskoeffizient $R = 0,49$ zwischen Siebwasser-Messung und den Messungen im Ausschussstrang unterstützt diese Zuweisung.

Die Modellierung von Retention und Formation unter Einbeziehung der Wet-End-Parameter zeigte: Ladungsmessungen leisten keinen Beitrag zur Modellierung der Zielgrößen. Eine automatische oder manuelle Ladungsregelung durch Anpassung des Fixiermitteleinsatzes erfolgte dabei nicht. Eine Abhängigkeit der Retentionsmitteleffizienz – damit der Flockung, der Retention und der Formation – von der Siebwasser-Ladung wäre zu erwarten [2, 24, 25]. Dass dies dennoch nicht signifikant nachweisbar war, kann am Messrauschen liegen, daran, dass die kolloidale Ladung vom Fixiermittel bereits ausreichend abgefangen wird, oder daran, dass mit der Ausschuss-Ladung auch andere Ausschusseigenschaften variieren, die die Ladungseinflüsse auf die Retention und Formation kompensieren.

Kolloidale Ladung, PM B

Die kolloidale Ladung an PM B betrug im Untersuchungszeitraum $-40 \pm 7 \mu\text{eq/l}$. Die Schwankungen sind damit sehr gering. Zwar war die der Ladungswert gut modellierbar, doch eine Überlagerung durch Retentionseffekte und damit durch die Flächenmassebeeinträchtigt seine Aussagekraft (vgl. Kap. 5, S. 17).

Auch hier leisteten die Ladungsmessungen keinen Beitrag zur Modellierung der Zielgrößen Retention und Formation. Dies war angesichts des hinsichtlich Ladung sehr stabilen Prozesses zu erwarten.

Andere Wet-End-Parameter

Leitfähigkeit und pH-Wert streuten an der untersuchten Papiermaschine PM A gering, da keine Additive in wesentlich wechselnden Mengen eingesetzt werden, die Abweichungen auslösen können. Auch die Temperatur streute nur mit 1,2 K, wobei die stärksten Abweichungen nach Stillständen auftreten. In einem Wasserkreislauf-System ohne Kreislaufftrennung und mit relativ konstantem Frischwassereinsatz sind nur geringe Temperatur-, pH- und Leitfähigkeitsschwankungen zu erwarten.

Schlussfolgerungen

In den untersuchten Werken konnte den Wet-End-Größen kein Erkenntnisgewinn für Retention und Formation im Normalbetrieb der Papiermaschinen zugeschrieben werden. Damit ist die Rolle der Wet-End-Parameter differenziert zu diskutieren:

- Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert spielen an den untersuchten Anlagen allenfalls bei Anfahrvorgängen eine Rolle. Ihre Schwankungen im konstanten Betrieb waren zu gering, um sich nachweisbar auf Retention und Formation auszuwirken. Diese Aussage lässt sich für zahlreiche Produktionsanlagen verallgemeinern. Diese Größen sollten allerdings beachtet werden bei Anlagen, bei denen pH-Wert oder Leitfähigkeit beeinflussende Additive in wechselnder Menge zudosiert werden.
 - Auswirkungen einer sich im Normalbetrieb ändernden kolloidalen Ladung waren an den untersuchten Anlagen zur Produktion grafischer holzfreier Papiere nicht nachweisbar und wurden auch aus Betriebserfahrungen nicht berichtet. An anderen Anlagen ist dies anders: Zum Einfluss des Ausschusseinsatzes auf die Wet-End-Chemie liegen zahlreiche Belege aus verschiedenen Sortenbereichen vor [z. B. 2, 22, 24, 26].
 - Den Wet-End-Parametern ist bei Vergleichen zwischen Anlagen oder bei Änderungen einer Betriebskonfiguration (z. B. Additivwechsel) weiterhin eine wesentliche Rolle für die Prozessbewertung zuzuschreiben [22, 27, 28].
-

8 Modellbasierte Optimierung von Retention und Formation

8.1 Vorgehen

Ansatz

Die simultane Optimierung von Zielgrößen dient dazu, unter gegebenen Randbedingungen einen Satz von Einstellgrößen so zu finden, dass ein Kompromiss zwischen Produktionsaufwand, Erzielung der angestrebten Prozessperformance und Papierqualität erreicht wird. Dieser Kompromiss soll dem Kostenoptimum entsprechen.

Vorgehen	<p>Die Einflussgrößen, die Retention und Formation im Wesentlichen bestimmen, wirken gleichzeitig auch auf andere Zielgrößen in Prozess und Produktqualität. Eine simultane Optimierung allein von Retention und Formation erwies sich in den Anwendungsfällen als nicht sinnvoll. Es wurde daher ein Optimierungsvorgehen getestet, das weitere relevante Zielgrößen einbezieht.</p> <p>Das Vorgehen umfasste folgende Schritte:</p> <ul style="list-style-type: none">• Diskussion und Festlegen von Zielgrößen und deren Zielwerten• Kostenfunktionen für die Zielgrößen• Anpassen bestehender Prognosemodelle und Aufstellen von Modellen für die weiteren Zielgrößen• Kostenfunktionen der Einflussgrößen• Optimierung <p>Das Optimierungsvorgehen wurde für PM A ausgearbeitet.</p>
-----------------	---

8.2 Zielgrößen

Zielgrößen	<p>Für PM A wurden im Zusammenhang mit Retention und Formation die zusätzlichen Zielgrößen Porosität und Entwässerbarkeit (Trockengehalt vor Trockenpartie) als relevant herausgestellt.</p>
Grenzen der Retention	<p>Eine möglichst hohe Retention wird angestrebt. Negative Effekte bei zu geringen Werten sind:</p> <ul style="list-style-type: none">• Nicht retendierte Strichbinder aus dem gestrichenen Ausschuss verursachen White-Pitch-Ablagerungen, besonders in der Trockenpartie.• Hohe Feststoffgehalte im Siebwasser führen zu hoher Feststoffbeladung des Stoffängers. Dadurch steigt der Feinstoffgehalt im Klarwasser, über Spritzwässer verschmutzt die Siebpartie. <p>Beide Effekte haben vermehrte Papierdefekte oder Abrisse zur Folge, soweit dem nicht vorbeugend durch verstärkte Reinigung entgegen getreten wird.</p> <p>Retentionen unter rund 50 % waren als kritisch anzusehen.</p>
Grenzen der Formation	<p>Die Formation ist als optische Papierqualität wichtig. Hohe Werte des Sensors stehen für schlechte Formation. Qualitätsziel ist ein Wert unter 58; über 65 wird die Produktion als Ausschuss deklariert.</p>

Grenzen des Trockengehalts der Papierbahn

Die Einflussgrößen Mahlleistung, Retentionsmitteldosierungen und Lippenöffnung nehmen auch Einfluss auf die Entwässerungsleistung der Papiermaschine. Als Zielgröße wurde der Trockengehalt vor Trockenpartie herangezogen. Anzustreben ist ein möglichst hoher Trockengehalt, ohne spezielle Grenzwerte. Eine Erhöhung des Trockengehalts vor Trockenpartie ermöglicht Dampfeinsparung. Er kann zudem an trocknungslimitierten Papiermaschinen in eine Geschwindigkeits- und Produktionsmengensteigerung umgesetzt werden.

Grenzen der Porosität

Eine weitere wichtige Zielgröße an PM A ist im Hinblick auf die Weiterverarbeitbarkeit die Porosität des Papiers (Luftdurchlässigkeit nach Bendtsen). Sie wird im Labor gemessen. Der Wertebereich lag zwischen 400 und 800 ml/min; bei Werten über 700 ml/min steigt die Wahrscheinlichkeit von Anlagenausfällen in der Weiterverarbeitung.

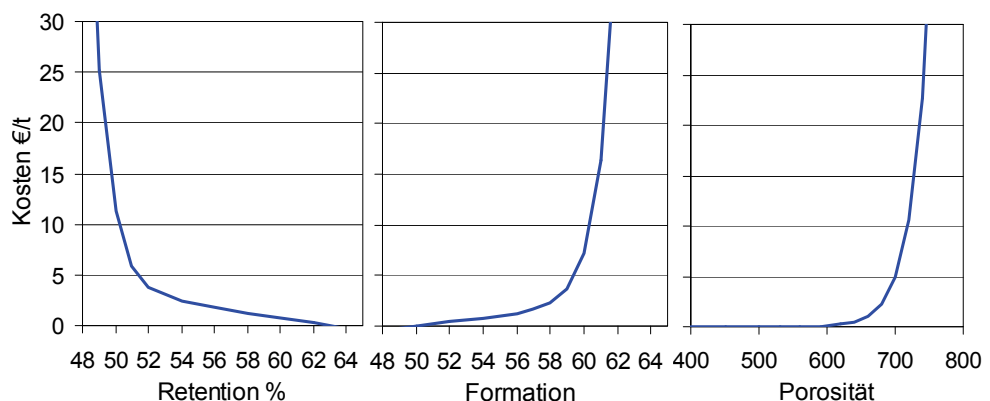
Kostenfunktionen

Die Kosten, die mit den Zielwerten verbunden sind, wurden für Retention, Formation und Porosität über Exponentialfunktionen mit zusätzlichem Linearglied aus Vorgaben des Betreibers und eigenen Annahmen abgeschätzt. Maßstab für die Höhe der Kosten ist bei Formation und Porosität, dass die Kosten für Ausschussproduktion in der Größenordnung des Deckungsbeitrags des Papiers (Annahme 300 €/t) liegen müssen. Folgende Gleichung wurden festgelegt:

$$\text{Kosten Retention in €/t} = 10 \cdot e^{50 - \text{Retention}} + 0,2 \cdot (63 - \text{Retention}) \quad (2)$$

$$\text{Kosten Formation in €/t} = 5 \cdot 10^{-23} e^{\text{Formation} - 7} + 0,2 \cdot (\text{Formation} - 50) \quad (3)$$

$$\text{Kosten Porosität in €/t} = 10^{-9} \cdot e^{(\text{Porosität} - 120) / 26} \quad (4)$$



Im Mittel führt eine Erhöhung des Trockengehalts vor Trockenpartie um 1 % zu einer Dampfeinsparung von 4–5 % [29]. Diese kann anteilig zur Produktionssteigerung eingesetzt werden. Die Berechnung erfolgt über den Deckungsbeitrag und den Anteil an Produkt, bei dem eine Geschwindigkeitssteigerung möglich ist (Annahme 1/3). Eine Kosteneinsparung von $5 \% \cdot 1/3 \cdot 300 \text{ €/t}$ pro Prozent Trockengehaltssteigerung ergibt sich (rechnerisch bezogen auf die Ausgangsproduktionsmenge):

$$\text{Kosten Trockengehalt} = -5 \text{ €/t} \cdot \text{Trockengehaltsteigerung in Prozentpunkten} \quad (5)$$

Als Ausgangswert wurde ein Trockengehalt von 50 % hinterlegt.

8.3 Prognosemodelle und Kosten der Einflussgrößen

Anpassen der Modelle

Die Regressionsmodelle aus der PLS-Modellierung von Normalbetriebsdaten (Kap. 6) wurden für die Optimierung angepasst. Die Auswahl an Inputs wurde auf manipulierbare Variable beschränkt. Dabei wurde die Maschinengeschwindigkeit als abhängig von der Flächenmasse angesehen. Auch die Füllstoffdosierung konnte nicht als unabhängige Variable eingestuft werden, da eine Asche-regelung vorlag. Die manipulierbare Größe ist der Aschegehalt im Papier.

Die Einflussstärken (Regressionskoeffizienten) wurden anhand theoretischer Betrachtungen, Vorkenntnissen aus anderen Projekten, Beobachtungen aus dem Datenbestand und Erfahrungen des Anlagenbetreibers modifiziert. Die Modellgleichungen wurden so umgeformt, sodass eine Einstellung von Mittelwerten m_{x_i} bei den Inputs unabhängig von den Regressionskoeffizienten zum Mittelwert des Outputs m_y führt:

$$y = m_y + \sum_i b_i \cdot (x_i - m_{x_i}) \tag{6}$$

mit x_i Input i ; y Zielgröße; m Mittelwert; b_i Regressionskoeffizient für Input i

Einflussparameter

Als relevante Einflussparameter wurden verwendet:

FM	Flächenmasse (flächenbezogene Masse)
Asche	Aschegehalt im Papier
Retm1	Dosierung Retentionspolymer
Retm2	Dosierung Nanopartikel
LF	Rezepturanteil Langfaser-Zellstoff
Mahlstg_KF	Mahlleistung spezifisch im Kurzfaserstrang (Leistung im Langfaserstrang ist konstant)
Lippe	Lippenöffnung (diese bestimmt zusammen mit der Retention die Stoffdichte im Stoffauflauf)
JetWire	Strahl-Sieb-Verhältnis

Visualisierung der Einflussstärken

Um Einflussstärken visuell bewerten und mit den Werksverantwortlichen diskutieren zu können, wurde mit folgender Oberfläche gearbeitet:

	FM	Asche	Retm1	Retm2	LF	Mahl_KF	Lippe	JetWire
Retention	0,25		12,0	4,00	30,0	0,420	-4,0	-177
Formation	-0,05		5,20	0,50	42,0	-0,055	-1,10	-300
Porosität	-6,67	-50,0			-400	-7,0		
TG vor TP			0,20	0,05		-0,04	-0,10	-2,0

Die Zahlenwerte sind die Regressionskoeffizienten. Die Breite der Balken gibt die Einflussstärke des Inputs für den Output wieder, entsprechend:

$$Breite = \text{Anzeigefaktor} \cdot \text{Regr.koeffizient} \cdot \frac{\text{Min} - \text{Max} - \text{Bereich Input}}{\text{Min} - \text{Max} - \text{Bereich Zielgröße}} \tag{7}$$

Einflussgrößen und Kosten

Die Einflussgrößen wurden in fixe Randbedingungen und für die Optimierung manipulierbare Größen unterteilt. Die Mittelwerte und gerundete Min-Max-Werte aus der Datenaufnahme wurden verwendet, sowie Kosten zugewiesen. Die Min-Max-Werte definieren den Einstellbereich des jeweiligen Parameters.

Input	Einheit	Typ	Mittel	Min	Max	Kosten
FM	g/m ²	fix	69			-
Asche		fix	14,3 %			-
Retm1	kg/t	manipulierbar	0,49	0,25	0,80	2,5 €/ (kg HW)
Retm2	kg/t	manipulierbar	1,73	1,0	2,5	1,0 €/ (kg HW)
LF		manipulierbar	0,19	0,17	0,23	50 €/t mehr als Kurzfaser
Mahlstg_KF_spez	kWh/t	manipulierbar	61	50	70	0,07 €/kWh
Lippe	mm	manipulierbar	12,3	11,5	13,0	keine
JetWire		manipulierbar	1,002	1,001	1,012	keine

Bezug: t Papier

HW: Handelsware

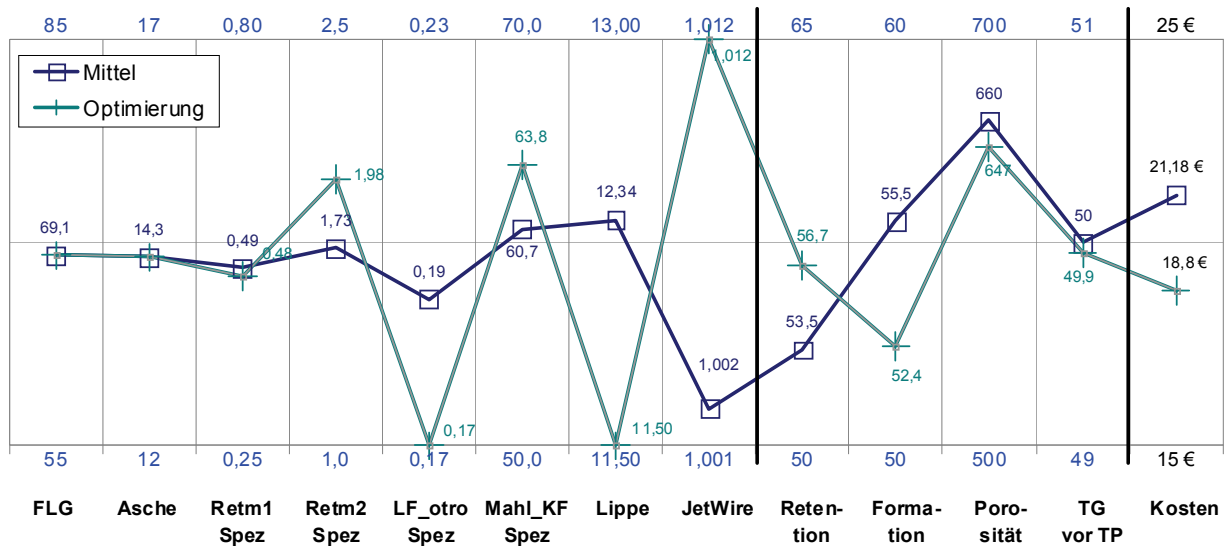
8.4 Optimierung**Methodik**

Für die Gesamtkostenfunktion wurden die Kosten der Inputs und Outputs aufaddiert. Optimierungsziel ist ein Kostenminimum. Die Grenzen des Einstellbereichs der Inputs wurden als Constraints (Nebenbedingungen) gesetzt.

Als Optimierungsalgorithmus wurde ein gradientenbasierter Optimierer verwendet (Excel-Solver). Vom Optimierungsalgorithmus wurde das Quadrat der Kostensumme minimiert.

Optimierung

Die Optimierungsberechnung wurde für eine mittlere flächenbezogene Masse und einen mittleren Aschegehalt durchgeführt. Die Kostensumme konnte um 2,4 €/t (von 21,2 auf 18,5 €/t) gesenkt werden:



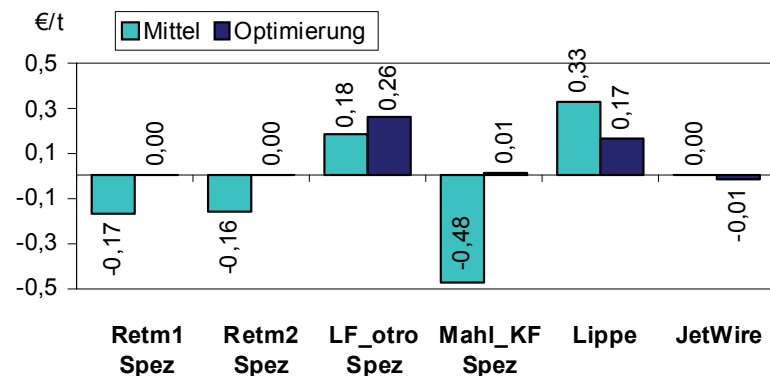
Bewertung

Das Optimierungsszenario sieht gegenüber dem Ausgangsszenario ("Mittel") eine Reduzierung des Langfaseranteils bis an die definierte untere Grenze vor. Der Langfaseranteil trägt zur Papierfestigkeit bei; diese ist jedoch im Ausgangszustand kein kritischer Parameter für das Produkt. Eine weitere wichtige Veränderung ist die Erhöhung der Mahlleistung. Retention, Formation und Porosität werden dadurch verbessert. Im Kosteneffekt kompensiert dies eine geringfügige Verschlechterung des Trockengehalts vor Trockenpartie. Für die Lippenöffnung schlägt das Optimierungsszenario einen Minimalwert vor. Dessen positiver Einfluss auf Retention und Trockengehalt wiegt stärker als der negative Einfluss auf die Formation.

Das gegenüber dem Ausgangsszenario erhöhte Strahl-Sieb-Verhältnis verbessert die Formation und verschlechtert die Retention. Der Kosteneffekt dieser Änderung ist gering (s. u.).

Sensitivität gegenüber den Inputs

Die Sensitivität der Kostensumme gegenüber einer Variation der Inputs ist aufgrund der exponentiellen Kostenfunktionen vom erreichten Niveau der Zielgrößen abhängig. Veränderungen der Einflussgrößen wirken sich im Ausgangsszenario (Mittel) und im Optimierungsszenario deutlich unterschiedlich auf die Gesamtkosten aus. Folgend dargestellt ist die Gesamtkostendifferenz zwischen Szenarien, bei denen gegenüber "Mittel" oder "Optimierung" jeweils ein Inputparameter um 5 % des Einstellbereichs herauf- beziehungsweise herabgesetzt wurde:



Bewertung

In beiden Szenarien hat der Langfaseranteil hohen Einfluss auf die Kostensumme. Bestimmend sind die Rohstoffkosten, die alle anderen Kosteneffekte übersteigen.

Während sich im Ausgangsszenario die Retentionsmitteldosierungen noch auf die Kosten auswirken, spielen sie im Optimierungsszenario keine Rolle mehr. Retention und Formation wurden verbessert und liegen in einem Bereich ihrer Kostenfunktionen mit flachem Anstieg. Gleichzeitig kompensieren sich rechnerisch Retentionsgewinne mit Formationsverlusten. Als Konsequenz für die Prozessführung ergibt sich ein hoher Freiheitsgrad für die Additivdosierungen ohne relevante Kosteneffekte.

Am stärksten differiert die Sensitivität für die Mahlleistung zwischen dem Ausgangs- und dem Optimierungsszenario. Hintergrund ist auch hier eine Balance der Einzelkosteneffekte: Mit steigender Mahlleistung verbessern sich Retention, Formation und Porosität, während der Trockengehalt fällt. Diese Balance ist an verschiedenen Arbeitspunkten deutlich unterschiedlich ausgeprägt.

Das Strahl-Sieb-Verhältnis hat insgesamt nur geringe Kosteneffekte. Der Freiheitsgrad bleibt offen, damit die Faserorientierung einzustellen.

Sensitivität gegenüber den Kostenzuweisungen

Die Optimierungslösung ist insgesamt stabil gegenüber getesteten Änderungen (Halbierungen und Verdoppelungen) der einzelnen Kostenzuweisungen.

Nur eine Verdopplung der Kostenzuweisung zum Trockengehalt vor Trockenpartie führt zu einer merklichen Veränderung: Die Retentionsmitteldosierungen werden dann durch den Optimierer auf maximal gesetzt, um den Trockengehalt auf Kosten der Formation zu steigern.

8.5 Validität der Optimierung und Schlussfolgerungen

Validität der Einzelschritte	<p>Das vorgestellte Optimierungsvorgehen beruht auf mehreren aufeinander aufbauenden Schritten, deren Validität im Einzelnen diskutiert werden soll:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sind die Funktionstypen richtig gewählt? • Ist die Funktionsparametrierung korrekt? • Sind die hinterlegten Kosten richtig? • Sind alle relevanten Effekte beachtet?
Funktionstypen richtig?	<p>Lineare Regressionsmodelle wurden verwendet. Die Modellgüten konnten durch Einbeziehen nichtlinearer Abhängigkeiten nicht signifikant verbessert werden (s. Kap. 6.1, S. 19). Dennoch sind aus den chemisch-physikalischen Zusammenhängen eher logarithmische, exponentielle oder sigmoide Zusammenhänge anzunehmen. Lineare Modelle können daher nur in einem begrenzten Variationsbereich angewendet werden. Diese Vorgabe wurde eingehalten.</p> <p>Für Retention, Formation und Porosität wurden exponentielle Kostenfunktionen zum Teil mit zusätzlichem linearem Glied verwendet. Diese kombinieren einen erlaubten Bereich mit flacher Kostenkurve mit einem Grenzwertbereich mit steilem Kostenanstieg.</p>
Parametrierung korrekt?	<p>Da die Identifikation von Abhängigkeit aus Normalbetriebsdaten nur für einige Einflüsse erfolgreich war, wurden weitere Regressionskoeffizienten prozess-technologisch fundiert abgeschätzt. Dieses Vorgehen der Modellparametrierung lässt keine absolut korrekten Optimierungsergebnisse erwarten. Für ein zukünftiges Optimierungsvorgehen ist dieses Verfahren zu verbessern, z. B. durch eine Modellierung umfassender Betriebsversuche.</p>
Kosten richtig?	<p>Als Kosten der Inputs wurden markttypisch festgelegt. Die Kosten für Formation und Porosität orientieren sich daran, dass Ausschussproduktion einen Verlust in Höhe des Deckungsbeitrags bewirkt. Die Kosten der Retention waren am schwersten fassbar. Die mit dem Trockengehalt vor Trockenpartie verbundenen Kosten hängen in hohem Maße davon ab, in welchem Ausmaß eine Trockengehaltssteigerung in eine Steigerung der Maschinengeschwindigkeit umgesetzt werden kann.</p>
Alle relevanten Effekte beachtet?	<p>Innerhalb des Einstellbereichs der Optimierung wurden die wesentlichen Auswirkungen an PM A beachtet. Weitere mögliche Auswirkungen etwa auf die Papierfestigkeit oder auf Ablagerungen wurden diskutiert, jedoch nicht als relevant erachtet.</p>

**Schluss-
folgerungen**

Durch die Modelle und die Optimierung wurden wichtige Zusammenhänge in ihren wesentlichen Auswirkungen dargestellt. Die Optimierungsberechnungen und -betrachtungen sowie die Sensitivitätsanalyse machen die Komplexität der Optimierungsaufgabe deutlich. In der Betriebspraxis ist ein Kostenoptimum schwer greifbar. Das vorgestellte Optimierungsvorgehen gibt dagegen klare Orientierung in der Kostendimension.

Aufgrund der getroffenen Annahmen ist die Optimierungslösung nicht unmittelbar für den untersuchten Betrieb anwendbar. In der vorgestellten Form und Validität liegt der Wert des Optimierungsvorgehens in erster Linie darin, Zusammenhänge transparent und diskutierbar zu machen. Damit ist es (noch) nicht als alleinstehendes Werkzeug geeignet. Es kann vielmehr als wertvolle Unterstützung im Optimierungsprozess eingesetzt werden.

9 Schlussfolgerungen

Aussagekraft von Onlinedaten aus Normalbetrieb Die Korrelationsanalyse deckte in den Datenbeständen aus dem Normalbetrieb der Anlagen Abhängigkeiten zwischen Größen auf, die prinzipiell unabhängig voneinander einstellbar wären. Insbesondere korrelieren Rezepturanteile oder Additivdosierungen häufig mit der Flächenmasse des Papiers. Gründe hierfür sind Rezepturfestlegungen des Anlagenbetreibers. Diese Multikollinearität erschwert eine kausale Interpretation der Korrelationen und die Identifikation und Bewertung von Einflussgrößen. Die grundsätzliche Frage stellt sich, welche Auswertungen aus mit Multikollinearität behafteten Datenbeständen aus dem Normalbetrieb dennoch möglich sind.

- Ohne Einschränkungen kausal auswertbar sind Einflüsse, die unabhängig von (anderen) Betriebseinstellungen sind, etwa die Außentemperatur oder Eigenschaften der Rohstoffe, soweit diese messbar sind und nicht gezielt ausgeregelt werden. Solche Parameter wurden im Forschungsvorhaben nicht erfasst; allenfalls die Ladungsmessung im Ausschusssystem fällt in diese Kategorie.
- Eine Modellierung von Normalbetriebsdaten ist geeignet zum Erstellen von Prognosemodellen (z.B. für Softsensoren) unter der Voraussetzung, dass die verwendeten Inputs mit der Zielgröße oder deren kausalen Einflüssen verlässlich korrelieren. Dann kann zum Beispiel die Stoffdichte in einer Ausschussbütte zur Formationsprognose [17] oder der Dampfbedarf der Trockenpartie zur Prognose der Leimung verwendet werden [30].
- Aus Daten aus Normalbetrieb lassen sich übliche Betriebsmuster oder auch beste unter den bereits umgesetzten Betriebsweisen erkennen.

Werden Subsets gebildet, innerhalb derer eine oder mehrere Variable konstant sind, lässt sich ein Teil der Multikollinearität aus dem Datenbestand herausnehmen. Für PM B wurden Subsets für verschiedene Flächenmassen erstellt. Einzelne weitere Abhängigkeiten konnten mit dieser Methode bestimmt werden. Um dem Problem der Multikollinearität vollständig zu entgehen, sind jedoch gezielte Betriebsversuche notwendig.

Modellgüte Aus a-priori-Wissen konnten geeignete Inputvariable für die Modelle zusammengestellt werden. Die Modelle wiesen insgesamt moderate bis gute Modellgüten auf und eigneten sich dazu, wesentliche Änderungen in den Zielgrößen zu prognostizieren.

Wet-End-Parameter Anhand der im Normalbetrieb geringen Schwankungen durfte ausgeschlossen werden, dass die Wet-End-Größen pH-Wert, Temperatur und Leitfähigkeit in den untersuchten Werken im Normalbetrieb der Papiermaschinen eine Rolle spielen. Die Ladung ist gesondert zu betrachten: Kolloidale Ladungsträger stammen bei der Produktion holzfreier Papiere vorrangig aus dem Ausschuss und beeinträchtigen die Effizienz von Additiven. In den untersuchten Fällen konnten Zusammenhänge zwischen Ladung und Retention oder Formation jedoch nicht nachgewiesen werden.

Einflüsse

An PM A zeigt der Langfaseranteil im Modell die stärkste Wirkung auf die Formation. Etwas schwächer, aber in etwa gleichem Ausmaß wirkten Retentionspolymer, Nanopartikel und Strahl-Sieb-Verhältnis. An PM B konnten als relevante Parameter die Menge an ungestrichenem Ausschuss, die Lippeneinstellung, die Nanopartikeldosierung und eine Massenstärkedosierung aus Betriebsversuchen quantifiziert werden.

An PM A wurden als auf die Retention wirkende Größen die Maschinengeschwindigkeit beziehungsweise die mit ihr in Zusammenhang stehende Flächenmasse, Retentionspolymer, Füllstoffdosierung und die Mahlleistung identifiziert und quantifiziert. An PM B konnte aus den Subsetbildungen die Wirkung einer Stärkedosierung quantifiziert werden.

Bekanntermaßen wichtige Einflüsse auf Retention und Formation konnten so bestätigt werden. Die Einflussrichtungen entsprechen insgesamt den Erwartungen aus Grundlagenwissen und Literatur. Nicht alle anzunehmenden Einflüsse konnten aufgrund des Kollinearitätsproblem auch quantitativ gefasst werden.

Simultane Optimierung

Für die nachfolgende Optimierung waren daher prozesstechnologisch fundierte Annahmen zu treffen. Kostenfunktionen wurden auf Basis von Angaben des Betriebes erstellt und deren Parameter abgeschätzt. In die simultane Optimierung von Retention und Formation wurden weitere Zielgrößen einbezogen. Für die praktische Anwendung ist ein geschlossene, multivariate Optimierung ist erst dann sinnvoll, wenn die Auswirkungen auf alle relevanten Zielgrößen beachtet werden.

Durch die Modelle und die Optimierung wurden wichtige Zusammenhänge in ihren Tendenzen dargestellt. Im Gegensatz zum bisherigen empirischen Vorgehen in den Betrieben wurden im erarbeiteten Optimierungsvorgehen Kosten greifbar gemacht. Auch unter dem Vorbehalt richtiger Annahmen erlaubt das Optimierungsvorgehen damit erstmals, komplexe Zusammenhänge in ihrer quantitativen Wirkung auf die Zielgrößen und die Kosten transparent zu machen. Dies ist eine unabdingbare Voraussetzung für eine zielgerichtete Optimierung. Nach weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist zu erwarten, dass eine quantitativ abgesicherte modell-unterstützte Optimierung im einzelnen Anwendungsfall möglich sein wird.

Wirtschaftliche Bedeutung

Eine stabile Retention auf hohem Niveau trägt entscheidend zur Produktivität der Papiererzeugungsanlage und zur Qualität des produzierten Papiers. Sie sichert die Stabilität und die Agilität des Wet End, vermeidet Ablagerungen und Reinigungsaufwand und ist Voraussetzung für eine hohe Leimungsmittel- oder Nassfestmittel-Effizienz. Wird simultan zur Retention auch die Formation als ein Basisparameter der Papierqualität verbessert, und dabei die Entwässerung und weitere wichtige Größen der Papierqualität einbezogen, entstehen Synergieeffekte in Bezug auf Produktivität und Qualität. Diese Synergieeffekte äußern sich in

- verbesserten Laufeigenschaften der Papiermaschine mit weniger Abrissen, höheren Maschinengeschwindigkeiten und wenig Reinigungsaufwand,
- effizienterem Einsatz von teuren Wet-End-Additiven,
- verminderten Feststoffgehalten in den Kreislaufsystemen und reduzierten Belastungen der Stofffänger- und Abwassersysteme,
- reduzierten Rohstoffverlusten,
- Energieeinsparung durch gute Entwässerung und
- konstanten Papierqualitäten auf hohem Niveau.

Multivariate Optimierungsverfahren für Retention, Formation, Entwässerung und weitere Qualitätsgrößen wie Festigkeit oder Porosität können zudem eine Basis bilden, um bisherige Regelungsstrategien für die Retention gezielt zu erweitern und zu verbessern.

Ansprechpartner für weitere Informationen:

Dr. Wolfram Dietz
Tel. 089/12146-279
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
www.ptspaper.de

Literaturverzeichnis

- 1 Dietz W.
Grundlagen von Retention, Entwässerung und Formation
In: Wet-End-Prozesse Modul 4: Optimierung von Retention, Entwässerung und Formation. W. Dietz, C. Mannert (Hrsg.). PTS-Manuskript PTS-MS 844, München 2008
- 2 Zeyringer E., Raser P.M., Rauch R.
Prozessoptimierungen bei Sappi Gratkorn
Allgemeine Papier-Rundschau 9, 16-21 (2005)
- 3 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. (eds.), Norderstedt, Germany 2008
- 4 Odell M., Pakarinen P.
Formation – influences and tuning
28th EUCEPA Conference, 152-168, Lisbon 2003
- 5 Gerli A.
Mechanischer, betriebstechnischer und chemischer Ansatz zur Verbesserung der Blattbildung bei holzfreien Papieren
Wochenblatt für Papierfabrikation 11-12, 600-606 (2007)
- 6 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, Germany (2001)
- 7 Shirt R., Manness M.
Dynamic simulation of retention chemistry effects using a material attribute array structure
TAPPI Engineering Conference Proceedings, 185-195, Atlanta/GA (1999)
- 8 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
Journal of Pulp and Paper Science 28:1, 1-5 (2002)
- 9 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)
- 10 Donat V., Paris J., Ven T.G.M. Van De
Simulation of a paper machine twin-wire forming section
J. Pulp and Paper Science 26:8, 284-288 (2000)
- 11 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 Jan 31, PAPTAC Montreal (2001)

- 12 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)
- 13 Kerekes R. J., Schell C.J.
Characterisation of fiber flocculation regimes by a crowding factor
J. Pulp Paper Sci. 18 J32-J38
- 14 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. Pulp Paper Sci. 29:3, 77-85 (2003)
- 15 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)
- 16 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: Physicochem. Eng. Aspects 287, 117-125 (2006)
- 17 Yli-Fossi T. et al.
Estimation of paper formation using recursive least squares method
Control Systems/Pan-Pacific Conference, June 16-18, Vancouver, PAPTAC Canada (2008)
- 18 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 Mar. ,San Antonio, TX, USA (2001)
- 19 Wise B.M. et al.
Manual, PLS_Toolbox 4.0 for use with MATLAB™
Eigenvector Research Inc., Wenatchee, WA 98801, USA 2006
- 20 Næs T. et al.
A user-friendly guide to multivariate calibration and classification
NIR publications, Chichester, UK 2002
- 21 Lindström T., Mähler A. and Norman B.
Formation/retention relationships from STFI-Packforsk EUROFEX trials
6th International Paper and Coating Chemistry Symp., Stockholm, June 7-9 (2006)
- 22 Kalmes O., Schulz J.
Optimierung einer Feinpapiermaschine
Wochenblatt für Papierfabrikation 132:11-12, 616-623 (2004)
- 23 Ojala T., Rantala T.
Management of colloidal and interface chemistry in papermaking – measurement methods and results
PTS Grenzflächensymposium, 7.-8. Juni, München 2005
- 24 Rantala T., Kumpulainen H., Nokelainen J., van Pembroke K., Grundmann M.
Wirtschaftliche Betrachtung eines Wet End Konzeptes mit KajaaniWEM
Wochenblatt für Papierfabrikation 17, 1004-1009 (2003)

- 25 Thiele B., Kopp J.W.
Ladungsbilanzen von Papiermaschinen-Systemen – Ein Weg zur Prozessoptimierung
Wochenblatt für Papierfabrikation 11-12, 542-554 (1997)
- 26 Latva M., Iivonen R.
Control of the wet-end chemistry in coated broke based on-line cationic demand and turbidity measurement
Control Systems Conference, Stockholm 2002
- 27 Williamson M.
Programm zum Chemikalienmanagement steigert Produktivität bei Burgo, Verzuolo
Wochenblatt für Papierfabrikation 18, 1090-1092 (2004)
- 28 Möller E.
Entwicklung zentraler Tools zur systematischen Optimierung des Wet End von
Papiererzeugungsanlagen
PTS-Forschungsbericht zum Forschungsprojekt IW 50281, PTS Heidenau 2007;
www.ptspaper.de
- 29 Williamson P.N., Browne T.C.
Energy cost reduction in the pulp and paper industry
Pointe Claire: Pulp and Paper Research Institute of Canada, 1999
- 30 Belle J., Kappen J., Goedsche F., Kühr H.-A.
Simulation based control of the sizing rate of resin sized paper
Professional Papermaking (Germany) 1/May, 23-29 (2005)