

Wirkung der Änderung von Prozessparametern in der Nasspartie auf die quantitative Veränderung der Formation und die sie beschreibenden Formationsindizes an Langsiebmaschinen

B. Zimmermann, Dr. G. Keller

Zusammenfassung

Durch die wachsenden Qualitätsanforderungen an Papiere steigt die Bedeutung der Formation als Qualitätsmerkmal immer mehr an. Das Ziel der Papierhersteller ist es deshalb, die Formation als Messgröße nicht nur zunehmend online zu erfassen, sondern auch im Herstellungsprozess gezielt beeinflussen zu können. Dabei soll vorzugsweise das vorhandene Prozessleitsystem genutzt werden.

Im Laufe des Projektes wurden verschiedene Einflussgrößen auf die Formation im Prozess der Papierherstellung quantitativ erfasst und bewertet. Die Messungen erfolgten an 2 Langsiebmaschinen und einem GAP-Former.

Die Interpretation der Zusammenhänge der Einstell- und Prozessparameter mit den gemessenen Formationskennzahlen brachte weitgehend die erwarteten maschinenspezifischen Abhängigkeiten. Im Einzelnen geben die Ergebnisse Auskunft über:

- wesentliche und unwesentliche Einflussfaktoren, teilweise auch über fehlende Informationen,
- quantitative Zusammenhänge zwischen Prozessgrößen und der Formation,
- ableitbare Empfehlungen zu Einstellungen der Papiermaschine (PM), die für die Qualität der Formation günstig oder weniger günstig sind.

Das Forschungsvorhaben AiF BR 14137 wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Summary

Formation gains in importance as a paper property because of the rising paper quality standards. Therefore it is an aim of the papermaker to measure the formation online and to control it. Thereby using the existing process control system would be the best and easiest way.

During the project work different parameters that influence the formation got quantified and analysed. The measurements were performed on 2 fourdrinier machines and 1 gap former.

The interpretation of the correlations between the process parameters and the measured formation parameters lead to the expected machine specific dependencies. The results provide information about:

- more and less significant influencing parameters, sometimes also about missing information
- qualitative correlations between process parameters and the formation
- references about machine adjustments resulting in better or worse formation

The AiF 14137 research project was sponsored by the German Federal Ministry of Economics and Technology BMWi and carried under the umbrella of the German Federation of Industrial Co-operative Research Associations (AiF) in Cologne. We would like to express our warmly gratitude for this support.

1 Einleitung

Durch die wachsenden Qualitätsanforderungen an Papier steigt die Bedeutung der Formation als Qualitätsmerkmal immer mehr an. Das Ziel der Papierhersteller ist es deshalb, die Formation als Messgröße nicht nur zunehmend online zu erfassen, sondern auch im Herstellungsprozess gezielt beeinflussen zu können. Dabei soll vorzugsweise das vorhandene Prozessleitsystem genutzt werden.

Zu den verschiedenen Einflussfaktoren auf die Formation wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, die prinzipielle Abhängigkeiten einzelner Faktoren zum Gegenstand hatten. Diese Einflussfaktoren lassen sich innerhalb des Herstellungsprozesses in drei wesentliche Gruppen unterteilen:

- die Stoffzusammensetzung (Faserart, Mahlung und Füllstoff) [1,2,3],
- die chemischen Hilfsmittel (Art des Hilfsmittels, Dosiermenge, Dosierort) [4,5,6,7],
- die Nasspartie (Stoffauflauf, Sieb, Entwässerungselemente).

Hinzu kommen noch konstruktive Merkmale der Papiermaschine (PM), wie Langsieb, Doppelsieb und Gapformer, die Unterschiede in der Papierstruktur bewirken.

Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen **Stoffzusammensetzung und Formation** wurde der Einfluss der Fasern untersucht. Dabei ergab die Verwendung von kürzeren Fasern eine bessere Formation. Allerdings führte dies auch zu geringeren Festigkeiten im Papier, so dass ein Optimum gefunden werden muss.

Im Hinblick auf die Wirkung von **chemischen Hilfsmitteln** wurde zum einen der Einfluss des Zugabeortes (beeinflusst mögliche Wechselwirkungen im Faserstoffgemisch) untersucht. In anderen Arbeiten wurden neue Hilfsmittelsysteme entwickelt, die einerseits die Formation, andererseits Retention und Runnability verbessern. Weitere Untersuchungen hierzu wurden seitens der PTS im Rahmen verschiedener Projekte des Forschungsclusters „Einflussfaktoren auf die Formation“ durchgeführt.

Die im Papierherstellungsprozess letzte Möglichkeit, die Formation noch entscheidend zu beeinflussen, ist die **Nasspartie**. Die Bedeutung von Turbulenzen im Stoffauflauf und Mikroturbulenzen auf dem Sieb wurde bereits frühzeitig erkannt [8]. In der Folge wurden Doppelsiebmaschinen entwickelt, die zu einer Verbesserung der Formation und anderer Papiereigenschaften führten. Den ersten Schritt bildeten die Doppelsiebformer [9,10]. Durch die hier erfolgende zweiseitige Entwässerung wird nicht nur die Formation, sondern auch die Füllstoffverteilung in Z-Richtung verbessert und die Unterschiede zwischen Ober- und Unterseite des Papiers werden verringert [11]. Außerdem ist bekannt, dass das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Stoffstrahl und Sieb sowie die Pulsation auf dem Sieb eine entscheidende Rolle für eine gute Formation spielen [12]. Für hohe Maschinengeschwindigkeiten wurden die Spaltformer entwickelt, bei denen der Stoffstrahl direkt in den Spalt zwischen zwei Sieben gespritzt wird. Untersuchungen haben gezeigt, dass dadurch eine starke Verbesserung der Formation erreicht wird [13], die sich auf die Verarbeitungseigenschaften (Streichen, Satinieren, Drucken) positiv auswirkt. Zwischen zwei- und dreilagigen Nasssieben konnten bei Untersuchungen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden [14].

Alle diese Untersuchungen zeigen, dass die Formation des Papierblattes durch sehr viele Faktoren beeinflusst wird, wobei der Grad der Beeinflussung bisher vor allem qualitativ ermittelt wurde (Formation wird tendenziell besser oder schlechter). Über Untersuchungen, die die Einflüsse dieser Faktoren **quantifizieren** und damit einen Ansatzpunkt für komplexe Regelstrategien liefern, wurde bisher wenig berichtet [15]. Genau das war der Ansatzpunkt für das vorliegende Projekt.

Die notwendigen Untersuchungen zur quantitativen Analyse von Zusammenhängen zwischen diversen Einflussfaktoren und den Formationskennzahlen wurden mit erprobter und an der PTS vorhandener Messtechnik an verschiedenen Papiermaschinen durchgeführt. Anschließend erfolgte eine Auswertung der Daten.

2 Aktueller Stand der Technik

Eine hohe Gleichmäßigkeit („Formation“) der Masseverteilung (Fasern und andere Papierbestandteile) im Papier ist eine der wichtigsten Zielstellungen im Papierherstellungsprozess. Eine direkte Messung der partiellen Schwankung der Masse (flächenbezogene Masse) von Papier ist aber nicht ohne weiteres möglich.

Aus diesem Grunde wird allgemein auf indirekte Messmethoden, wie

- Lichttransmission,
- Transmission radiometrischer Strahlung

zurück gegriffen. Als radiometrisches Messverfahren ist vor allem das System von Ambertec [16] bekannt. Infolge verschiedener Aspekte, wie Anschaffungskosten, sicherheitstechnische Fragen, Bezug zur visuellen Bewertung u. a., hat aber die optische Bewertung der Blattformation eine weitere Verbreitung gefunden.

Die einfachste Art dieser Beurteilung ist die visuelle Betrachtung des Papiers im Durchlicht. Hierbei spielt jedoch der subjektive Einfluss des Beurteilenden eine große Rolle, so dass allgemein auf objektive Methoden der Formationsbewertung orientiert wird.

2.1 Messtechnik Labor

Zur optischen Messung der Formation werden heute im Labor vorwiegend bildgebende Systeme (Scanner oder Kamera) genutzt, die Bilder der Papiere im Durchlichtverfahren aufnehmen und bewerten. Ein Beispiel für ein solches Prinzip ist in Abbildung 1 dargestellt.

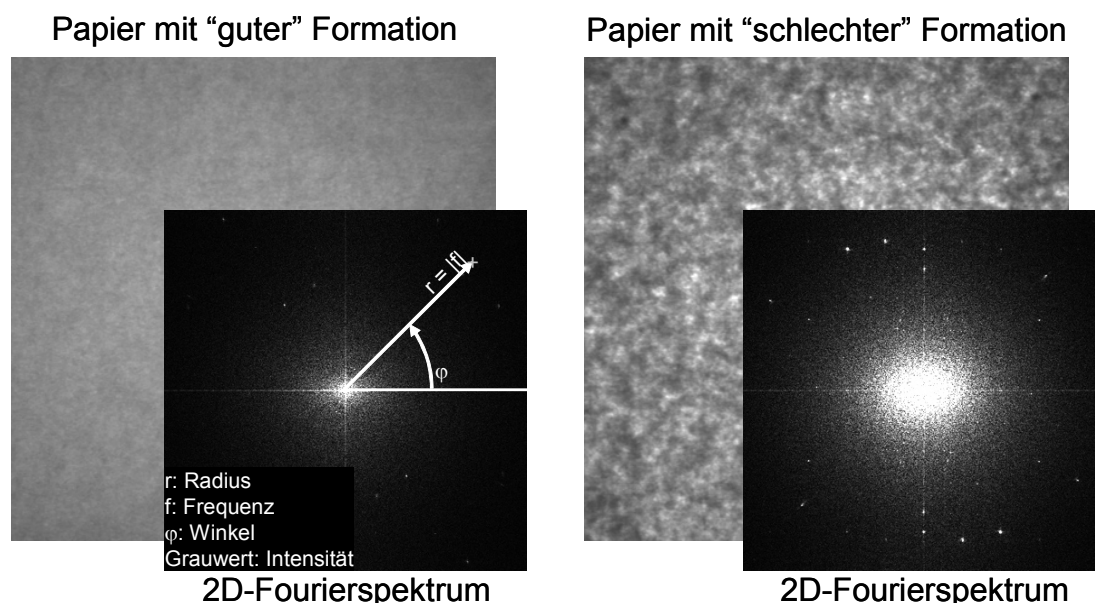


Abbildung 1: Flächenbasierte Formationsbewertung mittels Powerspektrumsanalyse am Fourier-transformierten Kamerabild

Für die messtechnische Bewertung der Formation der mit Kamera oder Scanner aufgenommenen Bilder werden im Labor eine Vielzahl von bildanalytischen Auswerteverfahren (Algorithmen) genutzt:

- Standardabweichung der Grauwerte,
- Kontrastvariation und Nachbarschaftsanalytik (Co-occurrence-Matrix),
- Powerspektrumsanalyse,
- PTS-Methode,
- Specific perimeter,
- Wavelet-Transformation,
- Autokorrelationsfunktion.

Aktuell am Markt verfügbare Geräte sind zum Beispiel:

- PTS: DOMAS-Modul Formation [17],
- TECHPAP: 2D Lab Formation Sensor,
- OpTest: Paper PerFect Formation Analyzer,
- Kajaani: Formation Analyzer,
- Metso: Metso PaperLab Plus.

2.2 Messtechnik Online

Zur Online-Formationsmessung werden derzeit zwei unterschiedliche Messprinzipien eingesetzt:

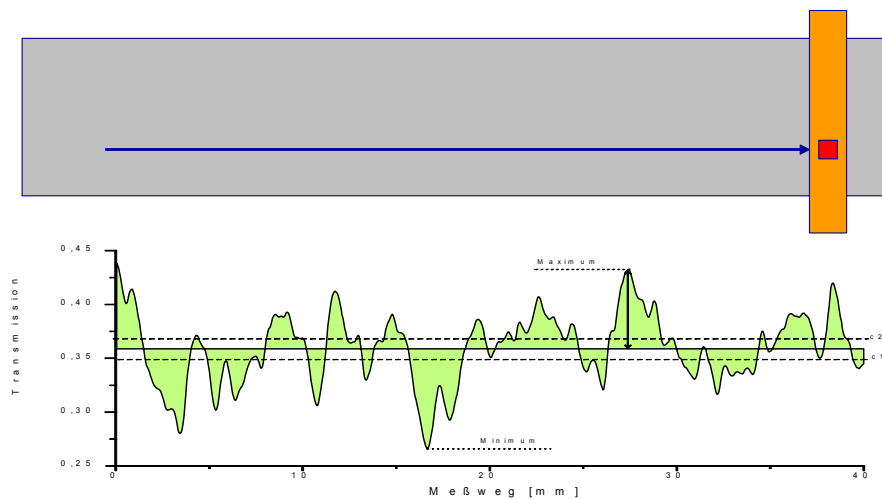
- Lichtpunkt- oder laserbasierte Verfahren, die eine Auswertung auf Linien durchführen,
- Kamerabasierte bildgebende Verfahren.

Letztere arbeiten mit ähnlichen Algorithmen wie sie auch für Laborsysteme üblich sind, aber mit größeren Bildpixeln, so dass die Differenzierbarkeit bei geringen Formationsunterschieden (derzeit) nicht immer gegeben ist.

Lichtpunkt- bzw. laserbasierte Messverfahren

Bei den Verfahren, die „nur“ eine Linienauswertung durchführen, bieten die laserbasierten Sensoren den Vorteil, dass kleine Messpunkte und eine hohe Ortsauflösung möglich sind (z.B. 10 bis 20 Messpunkte je mm), so dass auch feine Strukturunterschiede der Papiere und Siebstrukturen im Papier online erkannt werden können.

Ein solches System ist als mobiles System auch an der PTS vorhanden, so dass die für das Projekt notwendigen Messungen damit durchgeführt werden konnten. Das Prinzip der Formationsbewertung mit dem Laser-Formationsmesssystem FMS 850 ist in Abbildung 2 dargestellt.



Bisher üblich: 1 Parameter aus Helligkeitswerten berechnen
PTS (LSC): 2 ... 4 Parameter (aus 20) wählen

Abbildung 2: Linienbasierte Formationsbewertung (PTS-Laserformationsbewertung)[18]

Die bisherigen Erfahrungen mit dem FMS 850 zeigen, dass es durchaus sinnvoll ist, zur Formationsbewertung mehrere Parameter (Formationskennzahlen [18]) heranzuziehen. Die gebräuchlichsten sind:

Zur Bewertung von Kontrast/Amplitude:

- Fa mittlere lineare Abweichung des Profils vom mittleren Helligkeitswert,
- Fq mittlere quadratische Abweichung des Profils vom mittleren Helligkeitswert,
- Fdq mittlere Änderung des Formationsprofils.

Zur Bewertung von Wellenlänge/Wolkigkeit – Flockengröße:

- Fwi Wolkigkeitsindex (Maß für dunkle Bereiche),
- Fwo Maß für helle Bereiche.

Kamerabasierte Messverfahren

Es existieren gegenwärtig mehrere Lösungen zur kamerabasierten Online-Formationsmessung. Allerdings ist der Einsatz dieser Sensoren bei weitem nicht so flächendeckend wie z.B. für Flächenmasse-, Asche- oder Feuchtesensoren. Das mag auch daran liegen, dass wegen der fehlenden Kenntnisse über die Prozesszusammenhänge Formationssensoren nicht in die Regelmechanismen der Prozessleitsysteme (PLS) integriert sind.

Bezüglich der Bildauswertung wurden in diesen Systemen in der Regel die Algorithmen der Laborgeräte übernommen und die Hardware an die Messung an der laufenden Papierbahn angepasst.

Online-Messungen der Formation werden in den meisten Fällen an ähnlichen Positionen vor der Aufrollung durchgeführt, an denen auch die üblichen Messrahmen installiert sind. In Abbildung 3 ist eine Langsiebpapiermaschine mit der typischen Formationsmessstelle nach der Trockenpartie dargestellt. Außerdem sind die Stellen am Stoffauflauf gekennzeichnet, an denen eine Einstellungs- bzw. Parameteränderung große Auswirkungen auf die Formation hat. Durch die räumliche Trennung ergibt sich eine systembedingte Totzeit zwischen Prozessänderung und Messwertänderung. Diese wird üblicherweise noch größer durch die teilweise instabilen Übergangszustände, die nach einer Parameteränderung auftreten können.

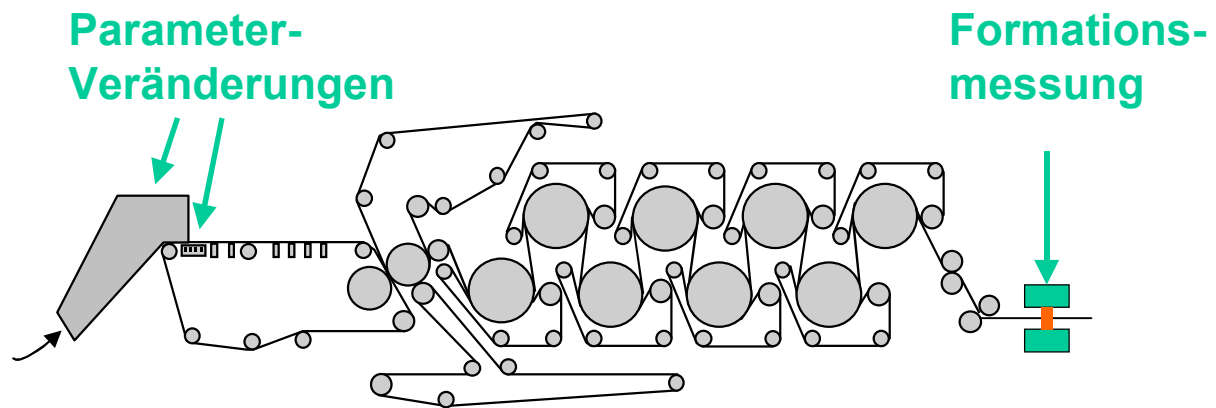


Abbildung 3: Örtliche Beziehungen an der Papiermaschine für Parameteränderungen und Formationsmessung

3 Definition der Formation

Die Formation ist in der DIN 6730[19] als die räumliche Verteilung der Fasern im Papier definiert.

Allerdings gibt es in der Norm bislang keine Angaben dazu, in welcher Form eine Messung der Formation durchzuführen ist, oder welche quantitativen Parameter die Formation auszeichnen.

Diese Unklarheit hat in der Praxis dazu geführt, dass es sehr viele verschiedene Formationsmesssysteme gibt, die sich in ihrer Hard- und Software deutlich unterscheiden und deren Messdaten untereinander nicht vergleichbar sind. Selbst Trends werden teilweise unterschiedlich oder ungenau wiedergegeben.

4 Formationskennzahlen

Durch die Unklarheiten bei der messtechnischen Bewertung der Formation haben sich nicht nur unterschiedliche Verfahren (radiometrische und optische) zur Formationsmessung etabliert. Auch die optischen Messverfahren und insbesondere die bildauswertenden Verfahren arbeiten mit völlig unterschiedlichen Auswertelgorithmen, die naturgemäß zu verschiedenen und nicht immer korrelierenden Resultaten führen. In der Praxis wird zwar häufig von einem Formationsindex gesprochen, dabei aber übersehen, dass es diesbezüglich sehr viele unterschiedliche Versionen gibt (vgl. 2.1).

In jüngster Zeit setzt sich die Erkenntnis durch [15, 20], dass die bisher vorherrschende Beschreibung der Formation durch nur einen Wert (Formationskennzahl, F-Index) dem komplexen Messproblem „Formation“ nicht gerecht wird. Es zeigt sich vielmehr, dass dafür mindestens 2 Messgrößen erforderlich sind, die z.B. Kontrastunterschiede im Papier und die typische „Flockengröße“ getrennt bewerten.

In diesen zwei Bereichen muss aus der Vielzahl der verfügbaren Parameter verwendungsspezifisch jeweils mindestens ein Parameter gewählt werden.

Diese Tatsache wurde auch im Projekt beachtet, indem bei allen Messungen von vornherein mehrere Formationskennzahlen bestimmt und ausgewertet wurden.

5 Formationssteuerung

Formationsmesswerte (Labor oder Online) werden bisher kaum zur Steuerung der Papiermaschine benutzt.

Das liegt unter Anderem daran, dass:

- eine Online-Messung der Formation bisher nur an wenigen Papiermaschinen durchgeführt und prozesstechnisch ausgewertet wird,
- die quantitativen Zusammenhänge zwischen der Formation und den zugehörigen vielen Einflussgrößen nicht genau untersucht sind (Gegenstand des vorliegenden Projekts), weshalb Formationsensoren häufig nicht in PLS eingebunden sind.

In Vorbereitung des Projektes wurde deshalb eine Umfrage unter Experten (Papiertechniker, Messtechnikfirmen) durchgeführt, um eine Gewichtung der Bedeutung der Einflussfaktoren unter Berücksichtigung der Möglichkeit ihrer prozesstechnisch Änderung (durch das PLS) zu erhalten. Das Resultat ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Möglichkeit der Veränderung der einzelnen Parameter im Rahmen von Versuchen wurde ebenfalls eingeschätzt, so dass aus dieser Tabelle die Schwerpunkte für die anstehenden Untersuchungen abgeleitet werden konnten.

Tabelle 1: Wichtung der Einflussfaktoren auf die Formation

	Wichtung*	Veränderbarkeit**
Rohstoffe		
Faserstoffart	1,8	3,9
Mahlung	1,7	3,0
Füllstoff- und Feinstoff	2,4	3,9
Retentionshilfsmittel		
Art	2,7	2,7
Menge	2,5	2,9
Zugabeort	2,6	2,6
Eintragskonzentration	3,2	2,3
Stoffauflauf		
Stoffdichte	2,0	3,4
Stoffverteilung	1,8	4,2
Turbulenz	1,9	4,0
Rezirkulation	3,4	3,0
Lippengeometrie	2,0	4,3
Strahlgeschwindigkeit	2,1	3,1
Auftreffpunkt des Stoffstrahles	2,5	3,1
Verdünnung im Zulauf	3,0	3,5
Sieb		
Verhältnis Strahl-Siebgeschwindigkeit	1,5	2,5
Siebausführung	2,1	3,9
Siebschüttelung (wenn vorh.)	2,4	2,2
Einstellung der Entwässerungselemente (Foilwinkel)	2,2	3,4
Vakuum Entwässerungselemente	2,0	2,5
Entwässerungsgeschwindigkeit	1,0	2,0
Weiter Einflussfaktoren		
PM-Typ (Lang-, Doppelsieb, Gapformer)	2,0	6,0
Trocknung/Züge	4,0	6,0
* 1 = hoher Einfluss, 5 = geringer Einfluss		
** Veränderbarkeit während der Versuchsdurchführung: 1 = sehr leicht, 6 = unmöglich		
Achtung:	** im Gegensatz zur Beschreibung des Clusters wurde hier nur bewertet, ob sich diese Einflussfaktoren in Versuchen verändern lassen, unabhängig davon, ob diese über PLS steuerbar sind.	

6 Vorbereitung der Versuche

6.1 Messtechnik

Im Projekt wurden an insgesamt 3 Papiermaschinen Messungen durchgeführt. In allen Fällen wurde das von der PTS gemeinsam mit der VacuTec Messtechnik GmbH (Dresden) entwickelte Formationsmesssystem FMS 850 eingesetzt. In Abbildung 4 ist das System schematisch dargestellt. Kernstück ist ein Lasersensor, der sich durch folgende technische Parameter beschreiben lässt:

- Laserfokus 70 – 80 μm ,
- Messfrequenzen bis 2,5 MHz,
- Formationsmessung mit einem Messabstand von 10 bzw. 20 Punkten/mm,
- Messfrequenz an Maschinengeschwindigkeit angepasst,
- Papiersortenabhängig lassen sich (automatisch) 7 Helligkeitsstufen einstellen.

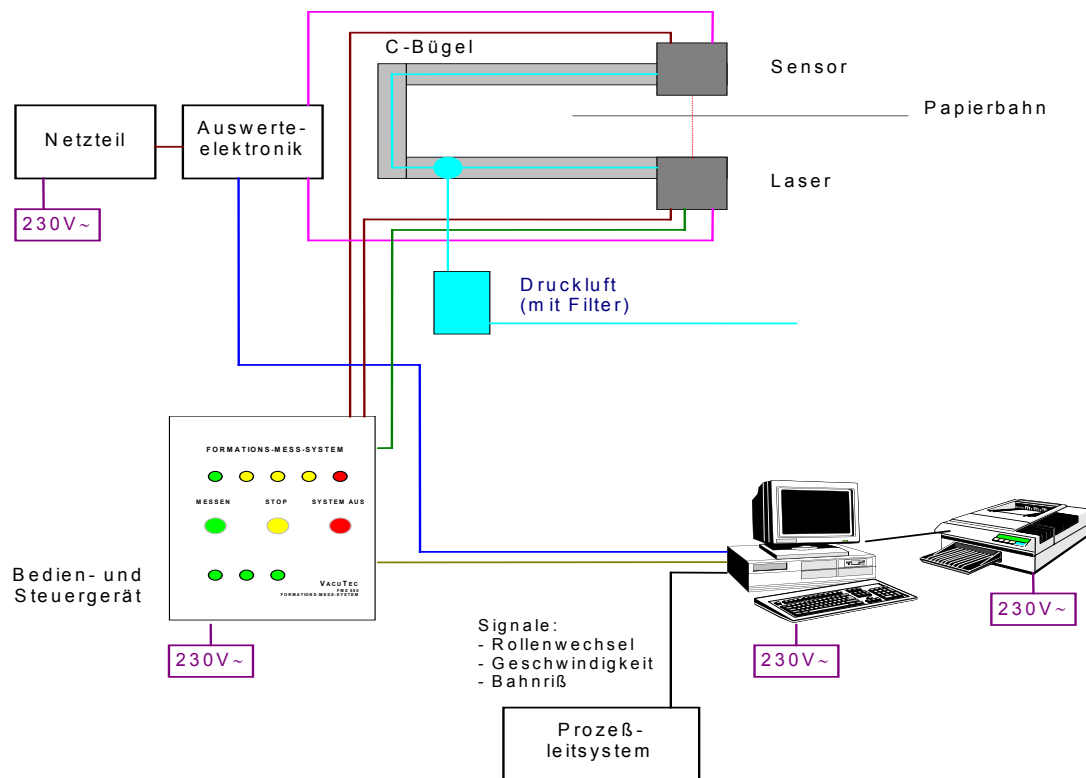


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Messsystems FMS 850

6.2 Vorbereitungen in der Papierfabrik

Zur Vorbereitung der Formationsmessungen und der Prozessbewertungen waren an allen untersuchten Papiermaschinen etwa die gleichen Schritte durchzuführen. Diese waren im Wesentlichen:

- konstruktive Vorbereitung des Einbaus des Messsystems in die Papiermaschine,
- Analyse und Auswahl der zur Verfügung stehenden Prozessparameter inklusive einer Gewichtung der Prozessparameter aus Sicht der Papierfabrik,
- Einbau des Messsystems und Integration der notwendigen Prozessparameter (Geschwindigkeit, Papierriss u.ä.).

Das Messsystem wurde im Projektverlauf in zwei Papierfabriken als C-Bügel-Version installiert und hat dort an einer festen Position gemessen. In einem weiteren Fall wurde es in eine vorhandene Messtraverse (Flächenmasse-Messung) integriert und war deshalb traversierend in Betrieb.

Die Datenübernahme aus den Prozessleitsystemen gestaltete sich schwieriger als erwartet, da die Systeme meist nicht auf einen standardisierten Export der Daten vorbereitet sind. Dies führte dazu, dass in einer Fabrik die Daten nur durch händisches Abschreiben gewonnen werden konnten.

7 Ergebnisse der Versuche

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird auf die Ergebnisse an einer Papierfabrik genauer eingegangen, da sich das Vorgehen in allen 3 Fällen wiederholte und die Ergebnisse vergleichbar waren.

Für die Messdatengewinnung wurde ein Zeitraum von 14 Tagen genutzt. Das Steuerprogramm war so eingestellt, dass pro Minute vier vollständige Messdatensätze mit Datum, Uhrzeit, Maschinengeschwindigkeit und 20 Formationsindizes ausgegeben wurden. Diese Datensätze wurden dann zu Minutenmittelwerten zusammengefasst.

Aus dem Prozessleitsystem wurden ebenfalls im Minutentakt Datensätze mit 41 Maschinenparametern abgerufen, von denen 13 für die Formation relevante Parameter waren und für die Berechnung verwendet wurden.

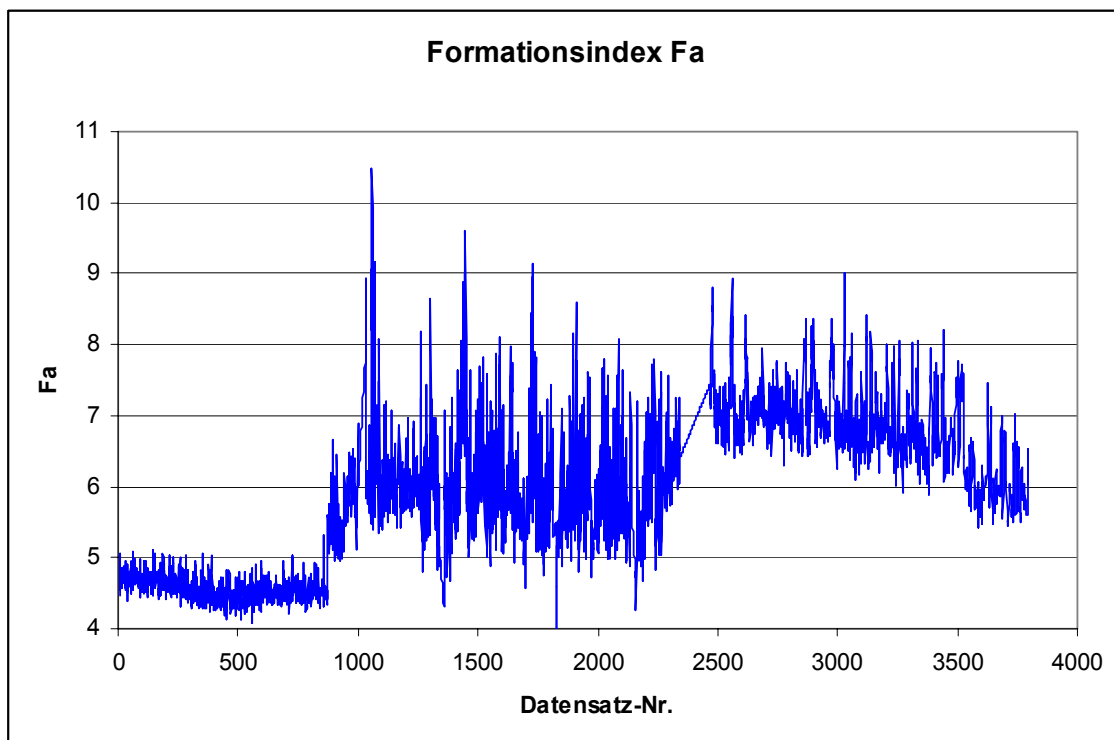


Abbildung 5: Formationsindex Fa (Minutenwerte)

Als Zielgrößen wurden ein vorwiegend kontrastabhängiger (Fa – siehe Abbildung 5) und ein vorwiegend flockengrößeabhängiger (Fwi – siehe Abbildung 6) Formationsindex ausgewählt und die Daten aus der Formationsmessung und dem PLS zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengeführt.

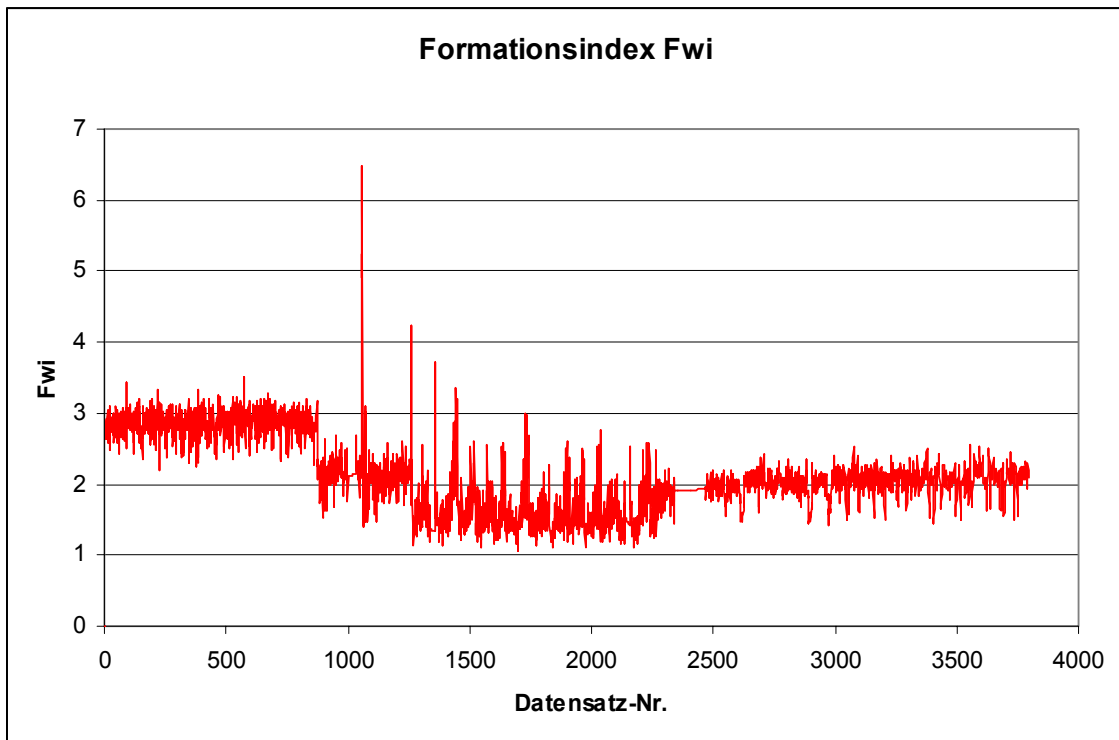


Abbildung 6: Formationsindex Fwi (Minutenwerte)

8 Auswertung der Messergebnisse

8.1 Kreuzkorrelation der Formationsindizes

Da erstmals so umfangreiches Datenmaterial aus dem laufenden Prozess vorlag, erfolgte im ersten Schritt eine Bestimmung der Korrelation zwischen den einzelnen Formationsindizes (Kreuzkorrelation). Das Ergebnis der Kreuzkorrelation über alle Datensätze ist in der Abbildung 7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die beiden für die Untersuchung ausgewählten Formationsindizes Fa und Fwi wie erwartet nicht korrelieren. In dieser Berechnung sind die Formationsindizes für alle während der Messungen produzierten Papiersorten enthalten.

Führt man diese Berechnung getrennt nach Papiersorten durch, so zeigt sich, dass die Kreuzkorrelationen unterschiedlich ausfallen. Sie sind also papiersortenabhängig. Als Beispiel ist die Kreuzkorrelation für die Papiersorte C1 in Abbildung 8 dargestellt. Bei keiner der untersuchten Papiersorten wurde eine Korrelation zwischen den Formationsindizes Fa und Fwi festgestellt.

	Fa	Rzpap	Fdq	Fgf=Sm/2	Lvn	Lwn	Fwi (0,02)	Fwo (0,02)	Fa+8*Fwi	100*(Fa+8*Fwi)/AFU	AFU (0,0)	AFO (0,0)	Fwi (0,0)	Fwo (0,0)	Fwi (0,04)	Fwo (0,04)	Afu (0,02)
Fa	1	-0,14	-0,28	-0,41	0,43	0,74	0,5	0,5	-0,04	-0,31	-0,31	-0,31	0,54	0,47	0,47	0,53	-0,3
Rzpap	-0,14	1	0,96	0,51	-0,73	-0,69	-0,87	-0,87	0,01	0,95	0,96	0,96	-0,81	-0,58	-0,62	-0,5	0,97
Fdq	-0,28	0,96	1	0,44	-0,66	-0,74	-0,86	-0,86	0	0,93	0,94	0,94	-0,81	-0,6	-0,63	-0,54	0,97
Fgf=Sm/2	-0,41	0,51	0,44	1	-0,63	-0,6	-0,72	-0,72	-0,02	0,69	0,59	0,59	-0,71	-0,45	-0,53	-0,47	0,55
Lvn	0,43	-0,73	-0,66	-0,63	1	0,89	0,77	0,77	-0,08	-0,79	-0,84	-0,84	0,69	0,54	0,58	0,45	-0,8
Lwn	0,74	-0,69	-0,74	-0,6	0,89	1	0,82	0,82	-0,05	-0,79	-0,82	-0,82	0,79	0,65	0,68	0,6	-0,8
Fwi (0,02)	0,5	-0,87	-0,86	-0,72	0,77	0,82	1	1	-0,05	-0,9	-0,93	-0,93	0,97	0,69	0,74	0,67	-0,91
Fwo (0,02)	0,5	-0,87	-0,86	-0,72	0,77	0,82	1	1	-0,05	-0,91	-0,93	-0,93	0,97	0,69	0,74	0,67	-0,91
Fa+8*Fwi	-0,04	0,01	0	-0,02	-0,08	-0,05	-0,05	-0,05	1	0,01	0,01	0,01	0,17	-0,05	-0,04	-0,04	0,01
'100*(Fa+8* Fwi)/AFU	-0,31	0,95	0,93	0,69	-0,79	-0,79	-0,9	-0,91	0,01	1	0,94	0,94	-0,86	-0,6	-0,66	-0,55	0,95
AFU (0,0)	-0,31	0,96	0,94	0,59	-0,84	-0,82	-0,93	-0,93	0,01	0,94	1	1	-0,87	-0,63	-0,67	-0,56	0,99
AFO (0,0)	-0,31	0,96	0,94	0,59	-0,84	-0,82	-0,93	-0,93	0,01	0,94	1	1	-0,87	-0,63	-0,67	-0,56	0,99
Fwi (0,0)	0,54	-0,81	-0,81	-0,71	0,69	0,79	0,97	0,97	0,17	-0,86	-0,87	-0,87	1	0,68	0,72	0,68	-0,86
Fwo (0,0)	0,47	-0,58	-0,6	-0,45	0,54	0,65	0,69	0,69	-0,05	-0,6	-0,63	-0,63	0,68	1	0,99	0,97	-0,63
Fwi (0,04)	0,47	-0,62	-0,63	-0,53	0,58	0,68	0,74	0,74	-0,04	-0,66	-0,67	-0,67	0,72	0,99	1	0,97	-0,66
Fwo (0,04)	0,53	-0,5	-0,54	-0,47	0,45	0,6	0,67	0,67	-0,04	-0,55	-0,56	-0,56	0,68	0,97	0,97	1	-0,55
Afu (0,02)	-0,3	0,97	0,97	0,55	-0,8	-0,8	-0,91	-0,91	0,01	0,95	0,99	0,99	-0,86	-0,63	-0,66	-0,55	1

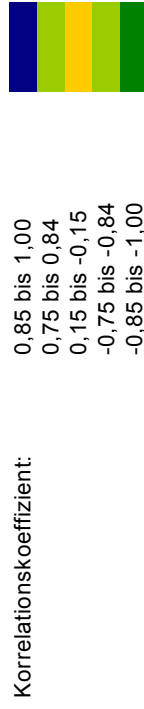


Abbildung 7: Kreuzkorrelation der Formationsindizes über alle Datensätze

	Fa	Rzpap	Fdq	Fgf=Sm/2	Lvn	Lwn	Fwi (0,02)	Fwo (0,02)	Fa+8*Fwi	100*(Fa+8*Fwi)/AFU	AFU (0,0)	AFQ (0,0)	Fwi (0,0)	Fwo (0,0)	Fwi (0,04)	Fwo (0,04)	Afu (0,02)
Fa	1	0,71	0,79	-0,65	0,81	0,82	-0,37	-0,44	-0,2	0,57	0,43	0,43	-0,37	-0,44	-0,25	-0,36	0,59
Rzpap	0,71	1	0,77	-0,53	0,66	0,72	-0,37	-0,45	-0,27	0,3	0,44	0,44	-0,38	-0,46	-0,28	-0,4	0,52
Fdq	0,79	0,77	1	-0,83	0,96	0,98	-0,72	-0,78	-0,64	0,04	0,81	0,81	-0,75	-0,8	-0,62	-0,71	0,86
Fgf=Sm/2	-0,65	-0,53	-0,83	1	-0,87	-0,81	0,82	0,84	0,7	0,1	-0,8	-0,8	0,77	0,79	0,87	0,92	-0,89
Lvn	0,81	0,66	0,96	-0,87	1	0,98	-0,77	-0,81	-0,69	0,02	0,85	0,85	-0,8	-0,84	-0,66	-0,73	0,91
Lwn	0,82	0,72	0,98	-0,81	0,98	1	-0,71	-0,76	-0,62	0,07	0,8	0,8	-0,74	-0,79	-0,61	-0,69	0,86
Fwi (0,02)	-0,37	-0,37	-0,72	0,82	-0,77	-0,71	1	0,94	0,88	0,47	-0,89	-0,89	0,9	0,85	0,85	0,85	-0,95
Fwo (0,02)	-0,44	-0,45	-0,78	0,84	-0,81	-0,76	0,94	1	0,83	0,36	-0,89	-0,89	0,86	0,91	0,82	0,87	-0,96
Fa+8*Fwi	-0,2	-0,27	-0,64	0,7	-0,69	-0,62	0,88	0,83	1	0,68	-0,95	-0,95	0,99	0,91	0,79	0,77	-0,81
100*(Fa+8*Fwi)/AFU	0,57	0,3	0,04	0,1	0,02	0,07	0,47	0,36	0,68	1	-0,48	-0,48	0,55	0,43	0,48	0,38	-0,24
AFU (0,0)	0,43	0,44	0,81	-0,8	0,85	0,8	-0,89	-0,89	-0,95	-0,48	1	1	-0,98	-0,98	-0,78	-0,81	0,9
AFO (0,0)	0,43	0,44	0,81	-0,8	0,85	0,8	-0,89	-0,89	-0,95	-0,48	1	1	-0,98	-0,98	-0,78	-0,81	0,9
Fwi (0,0)	-0,37	-0,38	-0,75	0,77	-0,8	-0,74	0,9	0,86	0,99	0,55	-0,98	-0,98	1	0,94	0,79	0,8	-0,87
Fwo (0,0)	-0,44	-0,46	-0,8	0,79	-0,84	-0,79	0,85	0,91	0,91	0,43	-0,98	-0,98	0,94	1	0,76	0,81	-0,88
Fwi (0,04)	-0,25	-0,28	-0,62	0,87	-0,66	-0,61	0,85	0,82	0,79	0,48	-0,78	-0,78	0,79	0,76	1	0,95	-0,81
Fwo (0,04)	-0,36	-0,4	-0,71	0,92	-0,73	-0,69	0,85	0,87	0,77	0,38	-0,81	-0,81	0,8	0,81	0,95	1	-0,85
Afu (0,02)	0,59	0,52	0,86	-0,89	0,91	0,86	-0,95	-0,96	-0,81	-0,24	0,9	0,9	-0,87	-0,88	-0,81	-0,85	1



Korrelationskoeffizient:
 0,85 bis 1,00
 0,75 bis 0,84
 0,15 bis -0,15
 -0,75 bis -0,84
 -0,85 bis -1,00

Abbildung 8: Kreuzkorrelation der Formationsindizes für die Papiersorte C1

8.2 Partial Least Squares (PLS)-Modell mit der Zielgröße Fa

Für die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Maschinenparametern und den Formationsindizes wurde ein PLS-Modell benutzt. Dieses Modell basiert auf der allgemeinen Form eines multivariablen Regressionsmodells [21].

Ziel bei der PLS-Regression ist es, die zu untersuchenden Daten mit möglichst wenigen latenten Variablen (LV's) zu beschreiben, welche möglichst große Varianz- und Kovarianzanteile repräsentieren.

Mit diesen Variablen wurde im ersten Schritt der mittlere Kalibrierungsfehler (RMSEC) berechnet. In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass dieser bei steigender Anzahl der zu berücksichtigenden LV's für das PLS-Fa-Modell abnimmt. Bei mehr als 3 LV's verringert sich dieser Fehler offensichtlich nicht weiter.

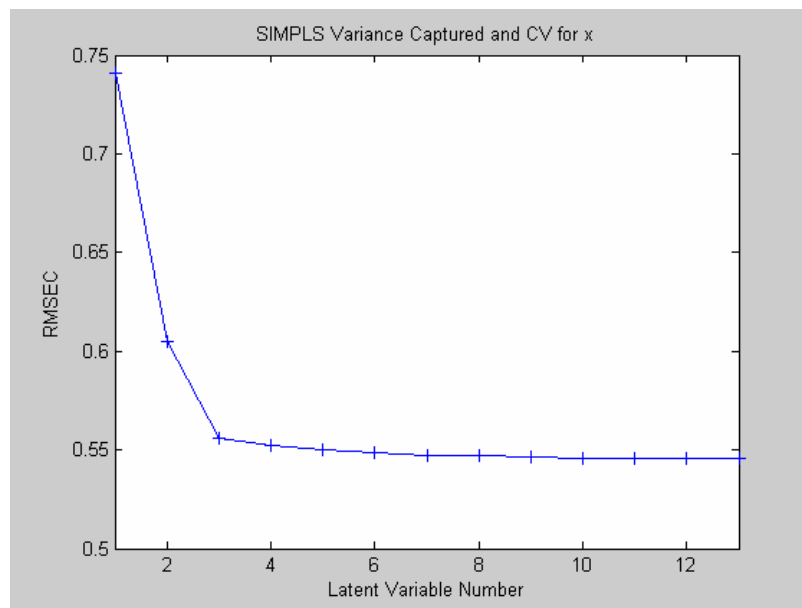


Abbildung 9: Mittlerer Kalibrierungsfehler in Abhängigkeit der Anzahl der latenten Variablen (PLS-Fa-Modell)

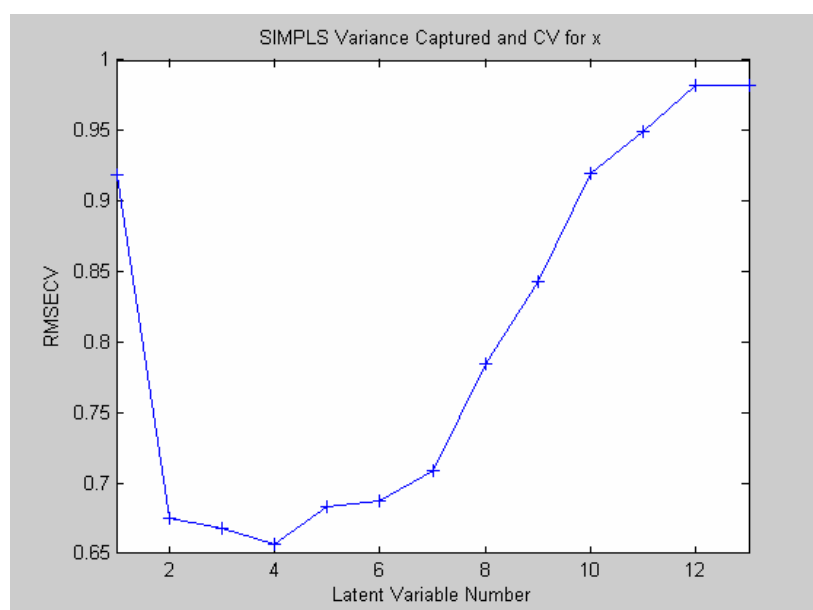


Abbildung 10: Mittlerer Prognosefehler in Abhängigkeit der Anzahl der LV's (PLS-Fa-Modell)

Betrachtet man den mittleren Prognosefehler (RMSECV) (Abbildung 10), ergibt sich ein Minimum bei 4 LV's. Aufgrund der höchsten Prognosegenauigkeit ist es daher sinnvoll, für das PLS-Fa-Modell 4 LV's zu berücksichtigen.

Die Daten des ausgewählten PLS-Fa-Modells mit 4 LV's lassen sich wie folgt zusammenfassen (PLS-Toolbox):

**Linear regression model using
Partial Least Squares calculated with the SIMPLS algorithm**

X-block: x 3770 by 13

Included: [1-3770] [1-13]

Preprocessing: Autoscale

Y-block: y 3770 by 1

Included: [1-3770] [1-1]

Preprocessing: Autoscale

Num. LVs: 4

Cross validation: contiguous block w/ 5 splits

RMSEC: 0.55195

RMSECV: 0.65703

Percent Variance Captured by Regression Model

Comp	-----X-Block-----		-----Y-Block-----	
	This	Total	This	Total
1	83.80	83.80	49.44	49.44
2	10.62	94.42	16.84	66.28
3	1.18	95.61	5.28	71.56
4	1.21	96.81	0.38	71.95

Es ist zu sehen, dass im Input-Block (X-Block) mit 96.81% die Gesamtvarianz abgedeckt wird, im Output-Kanal (Y-Block) mit 71.95% dagegen schon weniger. Dies kann auf ein starkes Rauschen oder eventuelle Einflussgrößen, welche bzgl. des Modells noch nicht betrachtet wurden bzw. nicht bekannt sind, zurückgeführt werden.

Tabelle 2: Input-Output-Korrelationskoeffizienten für den Output Fa

	Eingangsvariablen	Korrelation mit Fa
(1)	Asche-MW vor J.	0.6517
(2)	FG-MW nach J.	0.4242
(3)	%-AS	0.5524
(4)	%-ZS	0.6801
(5)	%-HS	0.6712
(6)	%-AP	-0.6864
(7)	Menge HV-Sauger	0.7827
(8)	Menge Flachsauger	0.2243
(9)	Menge Nasssauger	0.0815
(10)	Gesamtretention %	0.7399
(11)	Asche-Stoffverlauf	-0.7348
(12)	GSCHK Strahl-Sieb	-0.7400
(13)	Menge STA berechnet	-0.7506

In der Tabelle 2 sind die Korrelationskoeffizienten der Maschinenparameter hinsichtlich der Zielgröße Fa zusammengestellt. Den geringsten Einfluss hat der Parameter 9, Menge Nasssauger.

Um die Modellqualität und die erreichbare Prognosesicherheit des simulierten Outputs annähernd sicher zu stellen, wurden die verwendeten Daten auf „Ausreißer“ kontrolliert.

Für einen ersten Überblick über die Existenz von Ausreißern diente ein Diagramm, welches die Scores der 1. LV mit den Scores der 2. LV gegenüberstellte. Dabei beschreiben die Scores der 1. LV (2. LV) die Gewichte einzelner Datensätze bzgl. der 1. LV (2. LV), wobei über alle Input-Kanäle gemittelt wurde.

Liegen Datensätze in einem solchen Diagramm nahe beieinander bzw. bilden einzelne Gruppen, so besitzen sie ähnliche Eigenschaften. Es ist in Abbildung 11 auffällig, dass das vorhandene Datenmaterial in zwei Gruppen aufgeteilt ist, welche zwei grundsätzlich unterschiedliche Verhaltensweisen aufzeigen. Dabei besteht die linke Gruppe aus den Datensätzen 1 bis 851 und die zweite Gruppe aus den restlichen Datensätzen, also 852 bis 3770. Die Datensätze 1 bis 252, insbesondere 1 bis 242, liegen außerhalb der 95%-Vertrauensellipse, stellen aber keine deutlichen Ausreißer dar.

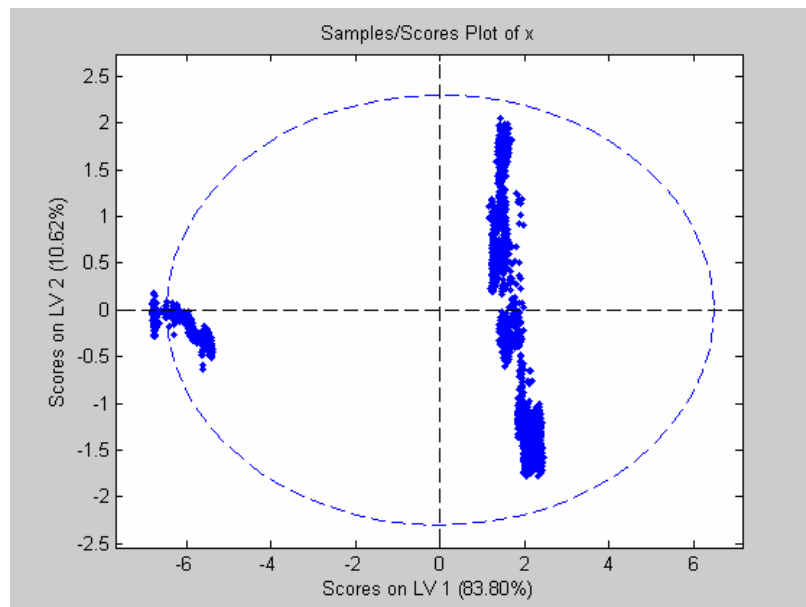


Abbildung 11: Scores der 2. LV über den Scores der 1. LV mit 95%-Vertrauensellipse für das PLS-Fa-Modell

Bei einem Blick in die Originaldatensätze sind zum Teil sehr große Verhaltensunterschiede in den einzelnen Variablen der beiden obigen Gruppen erkennbar. Schon allein die Datensätze der Gruppe 1 sind bzgl. der Gesamtretention fehlerbehaftet, was auf einen Sensordefekt zurückzuführen ist (vgl. Tabelle 3)

Tabelle 3: Aufteilung der Datensätze gemäß der Gruppenbildung (Betrachtung von Mittelwerten der Input-Variablen)

		DS 1 bis 242	Gruppe 1 = DS 1 bis 851	Gruppe 2 = DS 852 bis 3770
(1)	Asche-MW vor J.	14.67	14.86	33.91
(2)	FG-MW nach J.	44.94	44.96	50.83
(3)	%-AS	8.00	9.86	15.10
(4)	%-ZS	0.00	0.00	4.50
(5)	%-HS	10.01	13.35	23.48
(6)	%-AP	89.99	86.65	72.02
(7)	Menge HV-Sauger	1019.07	1053.84	1356.16
(8)	Menge Flachsauger	2021.62	2033.56	2181.59
(9)	Menge Nasssauger	912.34	1022.66	1658.56
(10)	Gesamtretention %	-468.45	-467.36	56.51
(11)	Asche-Stoffverlauf	100.52	100.52	44.70
(12)	GSCHK Strahl-Sieb	-45.00	-45.00	-55.00
(13)	Menge STA berechnet	1583.00	1585.63	1327.40

Eine noch leistungsfähigere Ausreißerkontrolle liefert die Darstellung der Student-Verteilung der Output-Residuen¹ über der so genannten „Leverage“. Die Leverage charakterisiert den Abstand des Datensatzes i vom Zentrum aller Beobachtungen bzgl. der Input-Variablen und ist sozusagen ein Einflussmaß der einzelnen Datensätze auf die Modellkalibrierung.

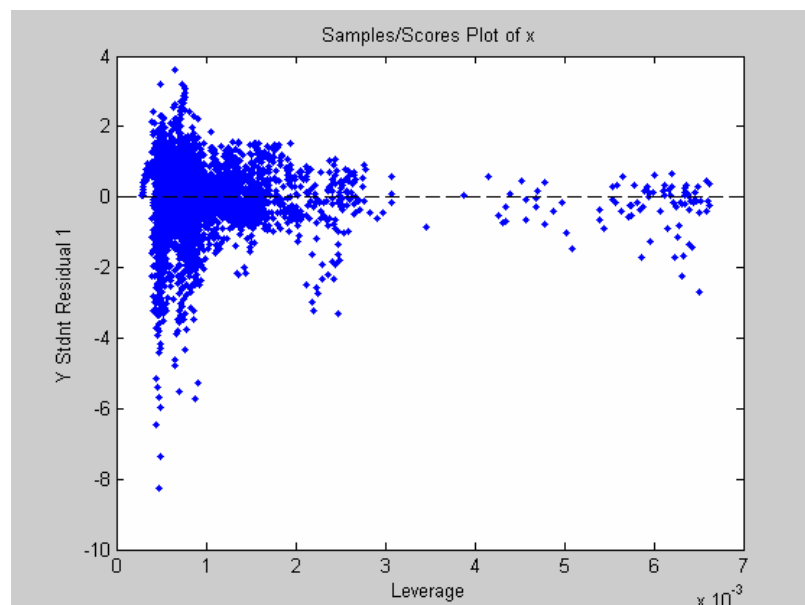


Abbildung 12: Student-Verteilung der Output(Fa)-Residuen über die Leverage für das PLS-Fa-Modell

¹ Dabei werden die Output-Residuen zentriert, d.h. der Erwartungswert ist Null und die Varianz Eins, und somit kann die vertikale Achse als Größe der Standardabweichung des Fehlers betrachtet werden.

Insbesondere weisen derartige Ausreißer-Datensätze, verglichen zur Hauptmasse, große Output-Residuen-Werte **und** große Leverage-Werte auf. Solche Datensätze treten jedoch im PLS-Fa-Modell nicht auf (vgl. Abbildung 12), so dass dieses nicht von markanten Ausreißern negativ beeinflusst wird.

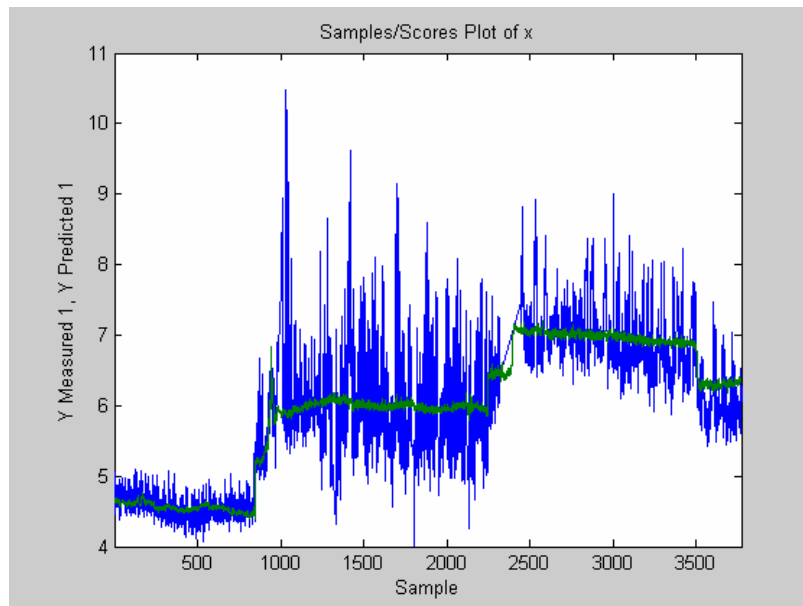


Abbildung 13: Vergleich zwischen prognostizierten und gemessenen Fa-Werten

Der Vergleich zwischen den vorhergesagten und den gemessenen Fa-Outputs bei PLS-Regression ist in der Abbildung 13 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Prognose sehr gut mit den gemessenen Werten übereinstimmt.

8.3 PLS-Modell mit der Zielgröße Fwi

Für das PLS-Fwi-Modell wurden die gleichen Daten wie für das PLS-Fa-Modell verwendet, lediglich die Zielgröße wurde ausgetauscht. Die Auswertung erfolgte analog zum vorigen Kapitel.

In der Tabelle 4 sind die Korrelationskoeffizienten der Maschinenparameter hinsichtlich der Zielgröße Fwi zusammengestellt. Es treten erhebliche Unterschiede auf, sowohl in der absoluten Höhe als auch im Vorzeichen. Der Parameter 9, Menge Nassauger, hat hier einen erheblichen Einfluss.

Tabelle 4: Input-Output-Korrelationskoeffizienten für den Output Fwi

	Fwi
(1) Asche-MW vor J.	-0.7859
(2) FG-MW nach J.	-0.7324
(3) %-AS	-0.6872
(4) %-ZS	-0.7745
(5) %-HS	-0.7738
(6) %-AP	0.7882
(7) Menge HV-Sauger	-0.7057
(8) Menge Flachsauger	-0.6821

(9)	Menge Nasssauger	-0.6059
(10)	Gesamtretention %	-0.7800
(11)	Asche-Stoffverlauf	0.7962
(12)	GSCHK Strahl-Sieb	0.7801
(13)	Menge STA berechnet	0.7591

Da, wie in Abbildung 7 und Abbildung 8 gezeigt, die beiden Formationsindizes nicht miteinander korrelieren, üben die Maschinenparameter einen unterschiedlichen Einfluss aus.

Zur Prüfung der Modellqualität wurden wieder die beiden Ausreißerkontrollen durchgeführt: auch in diesem Modell sind keine signifikanten Ausreißer festzustellen.

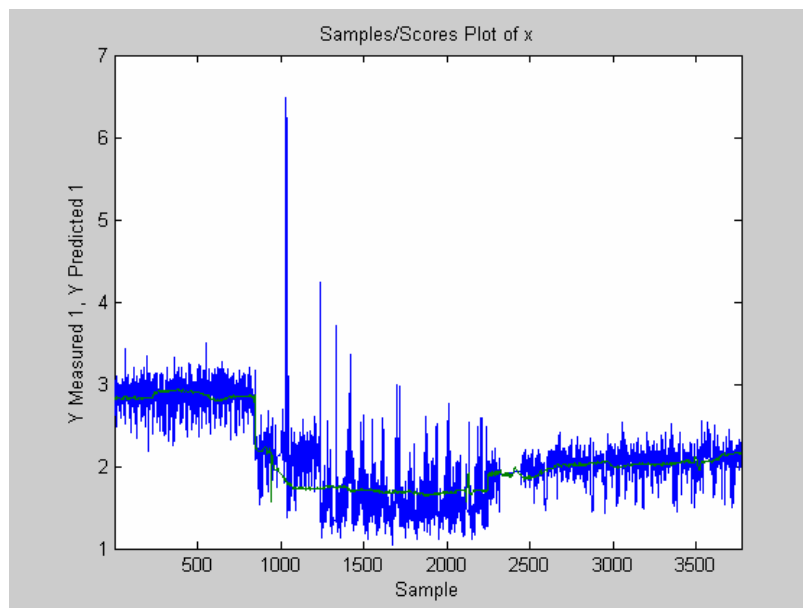


Abbildung 14: Vergleich zwischen prognostizierten und gemessenen Fwi-Werten

Der Vergleich zwischen den prognostizierten und den gemessenen Werten (Abbildung 14) fällt auch mit diesem Modell sehr gut aus.

9 Schlussbetrachtung

Zusammenfassend kann als Resultat des Projektes festgestellt werden, dass die beschriebene Vorgehensweise geeignet ist, die Zusammenhänge verschiedener Einflussfaktoren auf die Formation auch quantitativ zu bestimmen. Für potenzielle Anwender dieses Vorgehens ist damit eine genauere Prozessanalyse möglich, die zu Qualitätsverbesserungen der Papiere bzw. zu Einsparungen von Kosten (schnellerer Sortenwechsel) führen wird. Es wurde der erwartete Fortschritt im Vergleich zum Erkenntnisstand vor Projektbeginn erreicht.

Aus den Projektergebnissen lassen sich weiterhin folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Mit dem beschriebenen Vorgehen können die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Formation maschinenspezifisch ermittelt und quantifiziert werden. Es ist jedoch erwartungsgemäß nicht möglich, die quantitativen Ergebnisse einer PM auf eine andere zu übertragen.
- Im Projekt wurde das Prinzip an 2 Langsiebmaschinen und einer PM mit GAP-Former erprobt. Es zeigte sich, dass das Vorgehen für beide Typen geeignet ist, wobei beach-

tet werden muss, dass alle für die Formation wesentlichen Prozessgrößen erfasst werden müssen.

- Das untersuchte Verfahren ist für alle PM anwendbar. Ein Formationssensor muss dafür für ca. 4 Wochen an der PM installiert werden. Gleichzeitig zur Erfassung der Formationskennzahlen müssen alle wesentlichen Einflussgrößen (maschinenspezifisch) aufgezeichnet werden. Die Daten sind dann zeitsynchron zusammenzufassen und anschließend zu analysieren.
- Die wirtschaftliche Nutzbarkeit des Verfahrens/Vorgehens für kmU ist eindeutig gegeben. Dies betrifft sowohl die Anwendung in Papierfabriken zur Prozessoptimierung als auch die mögliche Integration des Vorgehens in die Steueralgorithmen von Prozessleitsystemen, die durch kmU angeboten werden.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben AiF BR 14137 wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Unser Dank gilt außerdem dem Messtechniklieferanten für die technische Unterstützung während der Projektlaufzeit und den Papierfabriken für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Björn Zimmermann
Tel 03529/551-687
bjorn.zimmermann@ptspaper.de

Dr. Gert Keller
Tel 03529/551-623
gert.keller@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
Pirnaer Str. 37
D-01809 Heidenau
Tel. (03529) 551-60
Fax (03529) 551-899
e-Mail: info@ptspaper.de
Internet: www.ptspaper.de

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Flächenbasierte Formationsbewertung mittels Powerspektrumsanalyse am Fourier-transformierten Kamerabild	3
Abbildung 2:	Linienbasierte Formationsbewertung (PTS-Laserformationsbewertung)	5
Abbildung 3:	Örtliche Beziehungen an der Papiermaschine für Parameteränderungen und Formationsmessung	6
Abbildung 4:	Schematische Darstellung des Messsystems FMS 850	8
Abbildung 5:	Formationsindex Fa (Minutenwerte)	9
Abbildung 6:	Formationsindex Fwi (Minutenwerte)	10
Abbildung 7:	Kreuzkorrelation der Formationsindizes über alle Datensätze	11
Abbildung 8:	Kreuzkorrelation der Formationsindizes für die Papiersorte C1	12
Abbildung 9:	Mittlerer Kalibrierungsfehler in Abhängigkeit der Anzahl der latenten Variablen (PLS-Fa-Modell)	13
Abbildung 10:	Mittlerer Prognosefehler in Abhängigkeit der Anzahl der LV's (PLS-Fa-Modell)	13
Abbildung 11:	Scores der 2. LV über den Scores der 1. LV mit 95%-Vertrauensellipse für das PLS-Fa-Modell	15
Abbildung 12:	Student-Verteilung der Output(Fa)-Residuen über die Leverage für das PLS-Fa-Modell	16
Abbildung 13:	Vergleich zwischen prognostizierten und gemessenen Fa-Werten	17
Abbildung 14:	Vergleich zwischen prognostizierten und gemessenen Fwi-Werten	18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wichtung der Einflussfaktoren auf die Formation	7
Tabelle 2:	Input-Output-Korrelationskoeffizienten für den Output Fa	14
Tabelle 3:	Aufteilung der Datensätze gemäß der Gruppenbildung (Betrachtung von Mittelwerten der Input-Variablen)	16
Tabelle 4:	Input-Output-Korrelationskoeffizienten für den Output Fwi	17

Literatur

- [1] MOHLIN U.-B.
Fiber dimensions – formation and strength
Nordic Pulp and Paper Research Journal **16**(2001), Nr. 3, S. 235 – 239
- [2] STOERE P., NAZHAD M. und R. KERKES
The effect of refining on paper formation
2000 TAPPI Papermakers Conference and Trade Fair, Band 2, S. 603 – 610
- [3] GERLI A. und H. BLEIER
Ein neues Mikropartikelprogramm für Retention und Entwässerung bei der Papierherstellung
Wochenblatt für Papierfabrikation 127(1999) nr. 21, S. 1396 – 1398

- [4] LAI R.; SANNE E.; HIETANIEMI M. u.a.
Leistungsfähiges Retentionssystem durch neue Mischtechnologie und optimierte Verweilzeit für die Chemikalien
International Conference on New Available Technologies, 04.06. bis 06.06. 2002 Stockholm, SPCI Stockholm 2002, S. 201 – 205
- [5] VAUGHAM C.W.; ADAMSKY F.A. und P.F. RICHARDSON
Zweikomponenten-Hilfsmittel für Entwässerung/Retention/Blattbildung verbessert Produktivität und Runnability der Papiermaschine
Wochenblatt für Papierfabrikation 126(1998), Nr. 10, S. 458 – 471
- [6] WEBB L.
Chemische Hilfsmittel für mehr Festigkeit nutzen
Pulp and Paper International **43**(2001), Nr. 1, S. 35 – 39
- [7] MANNERT C.
Verbesserung der Formation und der Bedruckbarkeit von SC-Papieren durch Optimierung der Wechselwirkungen zwischen Retention, Flockung und Entwässerung
PTS-Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben AiF 13670, (2006)
- [8] KUFFERATH W. und O. KALMES
Optimierung der Blattformation an Langsiebmaschinen
Das Papier **35**(1981) Nr. 10A, S. V159 – V175
- [9] SCHWEIGER J. und A. BUBIK
TWIN-Former SP – das fortschrittliche Hybridformersystem mit universellem Einsatzbereich;
Wochenblatt für Papierfabrikation **119**(1991) nr. 9, S. 323 – 328
- [10] MOSER H.; SCHMIDT-ROHR V.; GRABSCHEID J. u.a.
DuoFormer TQv – ein neuer Formar für grafische Papiere
twogether – Magazin für Papiertechnik (2000) nr. 10, S. 17 – 21
- [11] NORDSTROEM B. und NORMANN B.
Entwicklung des STFI-Blattbildners
Nordic Pulp and Paper Resaerch Journal **9**(1994) Nr. 3 S. 176 – 181

- [12] NORMANN B.
Hydrodynamische Entwicklungen für die Doppelsiebblattbildung – ein Überblick
Paperi ja Puu **78**(1996) nr. 6/7, S. 376 – 381
- [13] RAUHUT M., LECKEBUSCH H. und Th. GREVE
Auswirkung der Herstellung von Streichrohpapier mit Langsieb oder Gapformer auf die Strichqualität in der Praxis
Wochenblatt für Papierfabrikation **125**(1977) Nr. 11/12, S. 578 – 587
- [14] SCHLEGEL J.; KILPELAINEN R. und L. MAARVE
Der Einfluss von Nasssieben auf die Retention und Entwässerung bei Spaltformern
Wochenblatt für Papierfabrikation **122**(1994) Nr. 21, S. 833 – 838
- [15] BAUER A.
Aktuelle Formationsbewertung in der Industrie
Vortrag im Zellcheming-FUA-Onlinesensorik; (2006)
- [16] SUTMAN F. J., SLOAN D. R. und KRONZ H. L.
New Formation Measurement Method Helps Papermakers Maintain Form
Pulp & Paper; (2004)
- [17] PTS DOMAS-Beschreibung, Kapitel 10
- [18] PTS Formationsmesssystem FMS 850, Bedienungsanleitung
- [19] DIN 6730
Papier und Pappe; Begriffe
Ausgabe 06.2000
- [20] KELLER G.
Formationsmessung – ein Überblick
Vortrag im Zellcheming-FUA-Onlinesensorik; (2005)
- [21] Partial Least Squares Regression
http://www.vcclab.org/lab/pls/m_description.html