

Titel**ONLINE-VORAUSSAGE DER INITIALEN NASSFESTIGKEIT**

B. Zimmermann

Inhalt

1	Zusammenfassung	2
2	Abstract	3
3	Einleitung	5
4	Stand der Technik und der Forschung	6
4.1	Papierfestigkeiten	6
4.2	Initiale Nassfestigkeit (INF)	7
4.3	Aktuelles Vorgehen zur Beherrschung der INF	8
4.4	Prüfung der INF im Labor	9
4.5	Online-Messtechnik	10
4.6	Softsensoren	11
4.7	Modellbildung	12
5	Konzept Modellbildung	13
6	Versuchsplanung und Organisation	14
7	Vorbereitung Datenaufnahme	15
7.1	Vorbereitung Online-Bildgewinnung	16
7.2	Vorbereitung Online-Messung der Bahntemperatur	17
8	Aufbau der Datenbasis und Papieranalyse im Labor	19
9	Modellbildung	21
9.1	Datenvorverarbeitung	21
9.2	Korrelationsanalyse	22
9.3	Modellbildung	24
10	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	27

1 Zusammenfassung

Thema	Online-Voraussage der initialen Nassfestigkeit
Zielstellung	<p>Dieses Forschungsvorhaben verfolgte die Ziele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verfahren zur Online-Vorausbestimmung der initialen Nassfestigkeit (INF) • Beitrag zur Verbesserung der Produktivität der Papiermaschine <ul style="list-style-type: none"> • durch Reduzierung der Abrisse im Bereich des ersten freien Zuges • durch optimale Nutzung des Betriebsfensters • Beitrag zur Verbesserung der Effizienz der Papiermaschine <ul style="list-style-type: none"> • durch Optimierung des Additiveinsatzes zur Festigkeitssteigerung • durch Erhöhung des Füllstoffanteils • Untersuchung der stofflichen und strukturellen Einflussgrößen auf die initiale Nassfestigkeit
Ergebnisse	<p>Durch einen gezielten Versuchsplan wurden die verschiedenen Einflussgrößen auf die initiale Nassfestigkeit untersucht und in ein Modell integriert, das zukünftig online Voraussagen über die INF treffen kann.</p> <p>Im Rahmen des Projektes wurde eine erfolgreiche Modellbildung mit guter Qualität für einen maximalen Parametersatz und einen minimalen Parametersatz mit vier Eingangsvariablen durchgeführt. Die vier Parameter mit hohem Einfluss auf die INF waren dabei:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flächenmasse • Trockengehalt • Anteil Füllstoff • Formation <p>Aufbauend auf der Modellbildung wurde eine Handlungsanweisung formuliert, wie die Ergebnisse auf die Gegebenheiten an einer realen Anlage übertragen werden können.</p>
Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)	<p>Für die Modellbildung wurden verschiedene online verfügbare Informationen gezielt miteinander verknüpft. Diese Aufgabe muss zukünftig bei einer Soft-sensorentwicklung für eine spezifische Papiermaschine von einer meist kmU-basierten Automatisierungsfirma übernommen werden.</p> <p>Die erforderlichen Daten stehen zu einem Großteil in den entsprechenden Papierfabriken online zur Verfügung. Die restlichen Parameter können mit einem vergleichsweise geringen finanziellen Aufwand zukünftig zur Verfügung gestellt werden. Die entsprechende neue Sensortechnik wird von kmU-basierten Herstellern angeboten.</p>

Schlussfolgerung Durch das Modell zur Online-Voraussage der INF kann die Papiermaschine zukünftig produktiver und effizienter betrieben werden. Die Einflüsse auf die INF können besser beherrscht werden.

Zielerreichung Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Danksagung Das Forschungsvorhaben IGF 16275BR der AiF-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.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten deutschen und skandinavischen Firmen für die freundliche Unterstützung bei der Projektdurchführung.

2 Abstract

Theme Online-Prediction of Initial Wet Web Strength

Project objective The research project had the following objectives:

- Method for the online prediction of the Initial Wet Web Strength (IWWS)
- Contribution to improvements for the productivity of the paper machine
 - by reducing web breaks in the first free pass
 - by using the maximum range of the production parameters
- Contribution to improvements for the efficiency of the paper machine
 - by optimising the use of additives to increase the paper strength
 - by increasing the filler content
- Investigation of the substantial and structural influences on initial wet web strength

Results

By using an experimental design different influencing parameters on the initial wet web strength have been investigated and included in a mathematical model to calculate online predictions for the IWWS in the future.

During the project a high quality model was build by using a maximum parameter set and a minimum parameter set. The four parameter with a high influence on the IWWS were:

- Basis weight
- Dry content
- Filler content
- Formation

Building up on the modeling guide lines have been developed how the results can be transferred to a real paper machine.

Economic relevance of this research subject for small and medium enterprises (SME)

For the model different online available parameters have been combined. This task will be done in the future for a specific paper machine by by a mostly SME-based automation company.

The necessary parameters are normally online available in the most process control systems of the paper machine. Additional sensor technology for further parameters can be acquired with a small financial amount.

Conclusion

By using the model for IWWS the paper machine can by used in a more efficient and productive way. The influences on the IWWS are now better known.

The objective of the project has been reached.

Acknowledgement

The IGF 16275BR research project of the AiF 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.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

We would also like to express our thank to the involved German and Scandinavian companies for supporting project performance.

3 Einleitung

Aktuelle Situation

Die Initiale Nassfestigkeit (INF) von Papier ist ein Parameter, der für die Effizienz der unmittelbaren Papierherstellung von wesentlicher Bedeutung ist. Eine genaue Kenntnis der INF würde sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen der Steigerung der Effizienz aufzeigen. Allerdings ist die INF bisher nicht direkt im Prozess messbar.

Der Kostendruck erfordert die höchstmögliche Effizienzsteigerung der Papiermaschine zur Erhaltung der Wirtschaftlichkeit einer Papierfabrik und damit zur Sicherung des Überlebens. Die Papierindustrie produziert in Deutschland u. a. 9,8 Mio. Tonnen grafische Papiere (Stand 2008 [1]) und stellt somit einen wichtigen Wirtschaftszweig dar. Neue Spezialpapiere, welche auf üblichen Papiermaschinen mit den bekannten Verfahren hergestellt werden, können diese Position stabilisieren. An der Wertschöpfungskette Papier sind neben großen Papierfabriken viele mittelständische Unternehmen beteiligt. Ihre wirtschaftliche Entwicklung ist unmittelbar mit den großen Papierfabriken verbunden.

Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz

Bei der Produktion von grafischen Papieren kann die Effizienz durch Einsatz kostengünstiger Rohstoffe, einen erhöhten Füllstoffanteil, geringere Flächenmasse sowie höhere Maschinengeschwindigkeiten und Senkung der Stillstandszeiten gesteigert werden [2]. Diese Maßnahmen dürfen aber nicht zu einer verringerten Papierqualität führen.

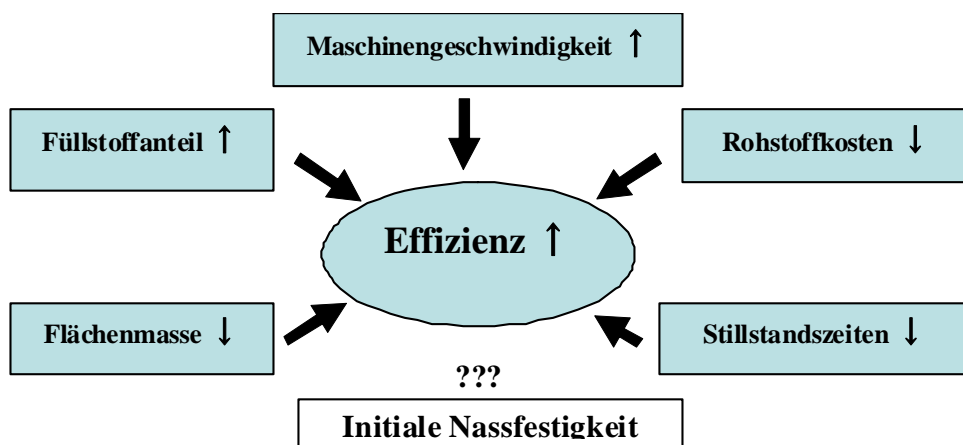


Abbildung 1: Einflussmöglichkeiten auf die Effizienz einer PM

Neue Papierprodukte

Zugabe neuer funktioneller Zusatzstoffe eröffnet Möglichkeiten der Erzeugung neuer Spezialpapiere wie z.B. Elektro-Isolierpapier, das auf üblichen Papiermaschinen hergestellt wird [3]. Auch bei diesen Produkten ist die Verhinderung von Ausschuss und Stillstand durch Abrisse ein Gebot der Kostensenkung.

Hemmnis Papierfestigkeit	<p>Ein erhöhter Anteil von Füllstoff oder funktioneller Additive verringert die Bindungsmöglichkeiten der Fasern und damit die Aufnahme von Kräften. Geringere Qualitäten von Rohstoffen müssen durch Additive ausgeglichen werden, um die Festigkeit auf dem Niveau zu halten [4], [5].</p> <p>Höhere Maschinengeschwindigkeiten führen zu größeren Zugbeanspruchungen der Papierbahn. Da Bahnrisse mit höchster Priorität zu vermeiden sind, muss das Papier dieser Beanspruchung standhalten. Besonders kritisch ist dabei der erste freie Zug innerhalb der Papiermaschine, da dort die Bahn erstmals ohne Siebunterstützung eine genügende Festigkeit aufweisen muss [2].</p>
Forschungsziel	<p>Ziel des Forschungsvorhabens war die Schaffung der Voraussetzungen zur Online-Voraussage der initialen Nassfestigkeit (INF) von grafischen Papieren. Da die INF eine abrissrelevante Papiereigenschaft darstellt, kann durch eine bessere Kenntnis dieser nicht direkt messbaren Größe die Papiermaschine effizienter betrieben werden.</p>

4 Stand der Technik und der Forschung

4.1 Papierfestigkeiten

Festigkeit im Anfangszustand	<p>Das nasse Papier ist ein Vlies aus weitgehend geschichteten Fasern, die sich nicht berühren, sondern über einen mehr oder weniger dicken Wasserfilm miteinander verbunden sind. Während die kleinen Poren des Vlieses vollständig mit Wasser gefüllt sind, sind es die größeren oft nur teilweise. Zugbeanspruchungen, denen das Papier ausgesetzt ist, können in diesem Zustand nicht über mechanische Vernetzungspunkte der Fasern aufgenommen werden. Sie werden vielmehr über die Kapillarkräfte der Wasserfilme realisiert. Diese wiederum sind abhängig von den Benetzungseigenschaften der Faserwände und der Oberflächenspannung des Wassers. In diesem Zustand wird die Papierbahn durch Siebe und Filze unterstützend geführt [6].</p>
Entwicklung der Festigkeit bei steigendem Trockengehalt	<p>Mit zunehmendem Wasserentzug (Pressung und Trocknung) werden die kleineren Poren entleert. Es verbleiben Wasserfilme in den Faserkreuzungspunkten. Nun beginnen die Van-der-Waals-Kräfte die Festigkeit des nassen Blattes zu erhöhen [6]. Infolge der hohen Affinität des Wassers zur Faserwand kommt es beim Trocknen nicht zur Verkleinerung der wasserbedeckten Fläche in den Faserkreuzungspunkten, sondern bei konstanter Bedeckungsfläche zur Verringerung der Filmdicke bis in molekulare Größenordnungen.</p> <p>Die Kräfte, die zum Aufziehen von Faserkreuzungen nötig sind, sind umgekehrt proportional zum Quadrat der Filmdicke. Mit zunehmendem Trockengehalt wachsen diese Kräfte also stark an. Hierin ist die Voraussetzung für die Annäherung von Fasern in den Faserkreuzungen zu sehen, die trotz eventuell vorhandener Spannungszustände in den Fasern stattfindet. Diese Annäherung der Faserwände erfolgt bis das Kräftegleichgewicht zwischen den Fasern hergestellt ist und die potenzielle Energie ihr Minimum erreicht.</p>

Festigkeit im trockenen Zustand

Bei trockenen Fasern kommen als Bindungsart in erster Linie Wasserstoffbrückenbindungen in Frage, die zwischen OH-Gruppen von Cellulosemolekülen in den Faserwänden aufgebaut werden können. Wasserstoffbrücken sind Van-der-Waals-Bindungen, die auf den Dipolcharakter des Wassers, der daraus abgeleiteten OH-Gruppe, zurückgeführt werden können [7]. Am Beispiel der Faser-Faser-Bindung werden die Kräfte zwischen den Hydroxylgruppen der Cellulosemoleküle wirksam. Wasserstoffbrückenbindungen erfordern die Annäherung der Oberflächen auf etwa 280 pm.

Kein Rückschluss auf die INF

Verschiedene Forschungsprojekte [4], [5], [8] haben gezeigt, dass zwischen den Festigkeiten im trockenen und im nassen Zustand wenige Zusammenhänge bestehen. Dies liegt an den unterschiedlichen Kräften, die in den jeweiligen Zuständen für die Festigkeit verantwortlich sind. Des Weiteren weisen rückbefeuchtete Blätter andere Festigkeitswerte auf als initial feuchte Proben, da die strukturellen Änderungen (durch Pressen, Glätten, Streichen etc.) nicht ungehehen gemacht werden können.

Aus diesen Gründen kann die initiale Nassfestigkeit nur an initial feuchten Blättern bestimmt werden.

4.2 Initiale Nassfestigkeit (INF)

Definition

Unter initialer Nass(zug)festigkeit (INF) wird die Gefügefestigkeit einer initial feuchten Papierprobe gegenüber Zugbeanspruchung in der Ebene der Probe verstanden.

Bedeutung

Die höchste Anforderung an die Nasszugfestigkeit erfährt die feuchte Papierbahn in der Regel im ersten freien Zug der Papiermaschine [9]. Wird die initiale Nassfestigkeit des Faservlieses dabei überschritten, kommt es zu Abrissen. In der Vergangenheit lag der erste freie Zug beim Übergang von der Siebsaugwalze zur ersten Presse, wo die Papierbahn Trockengehalte von ca. 18 bis 23 % aufweist. An modernen Papiermaschinen findet die erste freie Überführung der Papierbahn heute zwischen Pressen- und Trockenpartie bzw. innerhalb der Trockenpartie zwischen den Trockengruppen bei wesentlich höheren Trockengehalten statt.

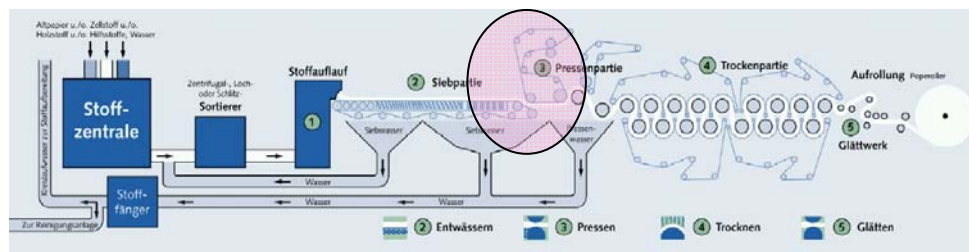


Abbildung 2: Kritischer Bereich in der Papierproduktion am Beispiel einer Langsiebmaschine[10]

**Überblick
Einflussgrößen**

Bestimmt wird die INF durch die Faserstoffart, die Fasermorphologie, den Quellzustand der Fasern sowie den Aschegehalt. Darüber hinaus ist die INF sehr stark vom Trockengehalt des Fasergefüges abhängig.

Tabelle 1: Einflussgrößen auf die INF

Flächenmasse	Aschegehalt	Dicke
Stoffzusammensetzung	Faserlängenverteilung	Einstellungen PM
Verhalten am Stoffauf- lauf (Flockung)	Trockengehalt (am 1. freien Zug)	Bahntemperatur
	Struktur (Formation)	

**Steuerung der
INF**

Zur Beherrschung der INF werden in der Praxis folgende Maßnahmen ergriffen:

- Regulierung der Züge im Bereich der Pressen
- Anpassung der Maschinengeschwindigkeit

Diese Maßnahmen sind mit zusätzlichen Kosten verbunden, die so gering wie möglich gehalten werden müssen.

4.3 Aktuelles Vorgehen zur Beherrschung der INF

**Bestimmung des
Betriebsfensters
für eine spezielle
Rezeptur**

Die primäre Strategie zur Steigerung der Effizienz besteht in einem möglichst genauen Abgleich zwischen dem Festigkeitspotential der Rohstoffe und den Anforderungen seitens der Papiermaschine vor der Produktionsaufnahme. Damit werden Rezepturen und Betriebsfenster der Papiermaschine festgelegt. Im Vorfeld der Produktion wird für eine spezifische Papierrezeptur an Laborblättern oder mit Hilfe von Versuchspapieranlagen ein Betriebsfenster für die Maschineneinstellungen bestimmt.

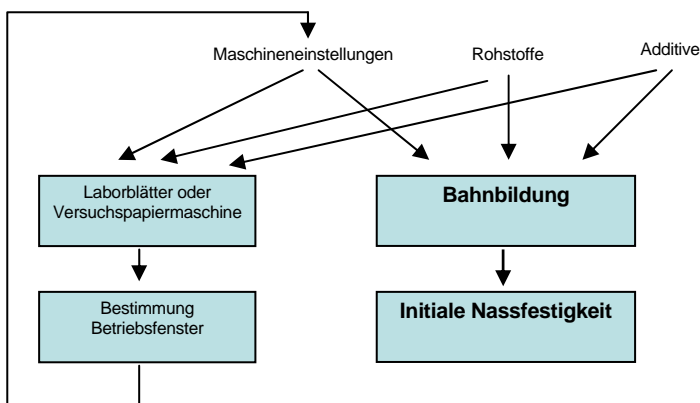


Abbildung 3: Projektion der realen Produktion auf die Laborebene

Beobachtung des Bahnverhaltens

Während der Produktion wird die Bahnbildung beobachtet, teilweise auch gerätetechnisch unterstützt (z.B. bildanalytische Überwachung der Bahnablösung). Auf der Basis von Erfahrungen wird dann die Betriebsweise der Papiermaschine eingestellt.

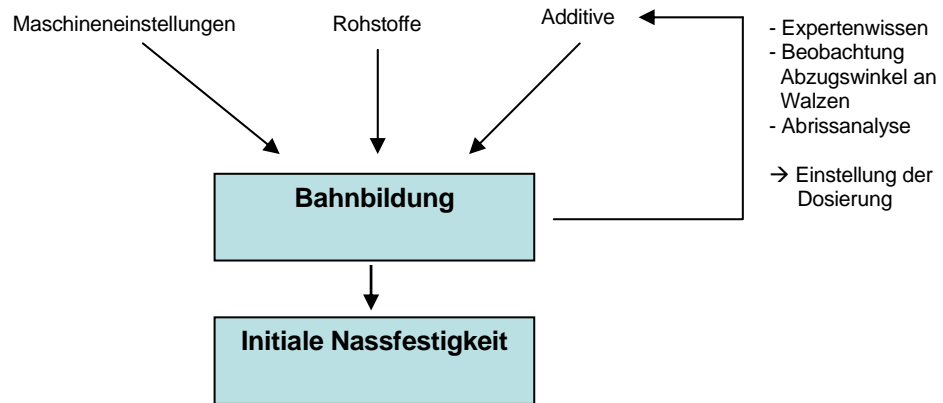


Abbildung 4: Online-Beobachtung der INF

Maschinenbauliche Unterstützung

Die Zugbeanspruchungen in der Papiermaschine sind mit der Maschinengeschwindigkeit über eine Polynomfunktion mit quadratischen Anteilen gekoppelt. Die Zugbeanspruchungen legen den Sollwert für die INF fest. Wird dieser unterschritten kommt es zum Bahnrisse.

Moderne Papiermaschinen berücksichtigen dies und unterstützen die Abrissvermeidung durch verschiedene Strategien.

Durch moderne Bahnführungsunterstützungen (zum Beispiel durch Vakuum in der Ablösezone der Papierbahn vom Zylinder) kann die Ablöselinie gleichmäßiger gestaltet werden. Dadurch wird die Zugbelastung reduziert [11]. Des Weiteren wird in den neuen schnelleren Papiermaschinen der erste freie Zug immer weiter nach hinten verschoben, wo der Trockengehalt der Papierbahn höher ist.

4.4 Prüfung der INF im Labor

Überblick

Festigkeitsprüfungen sind zerstörende Messverfahren und weisen in der Regel eine hohe Messwertstreuung auf. Folgende Methoden können zur Bestimmung der INF im Labor eingesetzt werden:

- Bewertung der INF nach ZM-Merkblatt VI/66 [12]
- Ermittlung der INF nach SCAN-M11 [13] und SCAN-M 12 [14]
- Messverfahren nach Voith [2]

Wie in [4] bestätigt, kann mit dem Messverfahren nach Voith die beste Reproduzierbarkeit erreicht werden.

Messverfahren nach Voith

Mit diesem Verfahren können die breitenbezogene Bruchkraft, die Bruchdehnung sowie das Arbeitsaufnahmevermögen bei Zugbelastung von initial feuchten Papieren gemessen werden. Das verwendete Zugprüfgerät mit einer speziellen Probeneinspannvorrichtung arbeitet mit konstanter Dehngeschwindigkeit. Weiterhin können mit diesem Verfahren der Bruchkraftindex, der Arbeitsaufnahmevermögens-Index und der Elastizitätsmodul berechnet werden. Die Einzelwerte werden über den Trockengehalt aufgetragen und dann wird über sämtliche Punkte die Trendlinie bestimmt. Vorteilhaft ist die Umrechnung auf den masseunabhängigen INF-Index. Darüber hinaus können an einer gemeinsamen Darstellung des INF-Index mit dem Tensile-Index die Festigkeitsunterschiede zwischen dem nassen und dem trockenen Muster visuell verdeutlicht werden. Das Verfahren ist anwendbar für alle Faserstoffe und wird entweder am feuchten Laborblatt oder an orientierten Proben aus der Papiermaschine bestimmt.

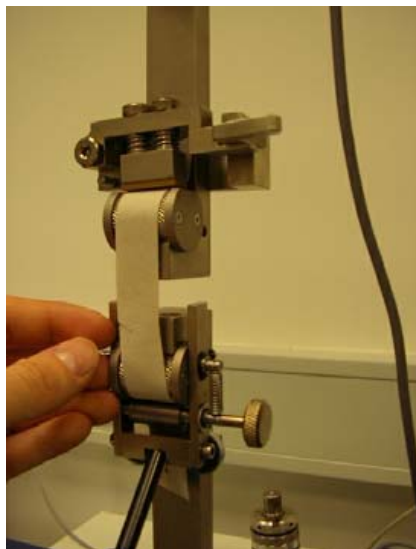
Detailaufnahme Zugprüfmaschine mit Spezialklammern

Abbildung 5: Prüfmaschine für die INF

4.5 Online-Messtechnik

Überblick

Online-Messtechnik wird in immer größerem Umfang zur Prozessüberwachung in der Papierindustrie eingesetzt. Neben den klassischen Sensoren zur Druck-, Geschwindigkeits-, Temperatur-, Flächengewichts- und Durchflussmessung setzen sich zunehmend auch moderne Messgeräte am Markt durch. Dazu zählen in besonderem Maße Online-Stoffanalysesysteme, Ladungsmessgeräte, Kameralösungen und NIR-Spektrometer [15].

Kameralösungen

Kamerasbasierte Systeme werden online an der Papiermaschine eingesetzt zur:

- Fehlererkennung (Löcher, Falten, Schmutzpunkte, etc.)
 - Randüberwachung
 - Gleichmäßigkeitsanalyse (Formation) [16]
-

NIR- Spektrometer

Auch durch die Forschungsarbeiten der PTS [17], [18] finden NIR- Spektrometer Verwendung an Papiermaschinen. Sie werden dabei zur indirekten Bestimmung von Papiereigenschaften genutzt (Aschegehalt, Feuchte, Papierinhaltsstoffe, statische Festigkeiten etc.). Durch die inzwischen verfügbaren Spektrometer, die über mehrere nebeneinander angeordnete Messköpfe verfügen, können auch Informationen über die Verteilung über die Bahnbreite gewonnen werden.

4.6 Softsensoren**Überblick**

Ein Softsensor ist eine Automatisierungslösung, die einen Messwert softwarebasiert berechnet, der sonst nicht oder nur mit erheblich größerem (finanziellen) Aufwand zur Verfügung stehen würde [19].

Schema

Im Rahmen einer Papiermaschine wird ein Softsensor wie folgt genutzt.

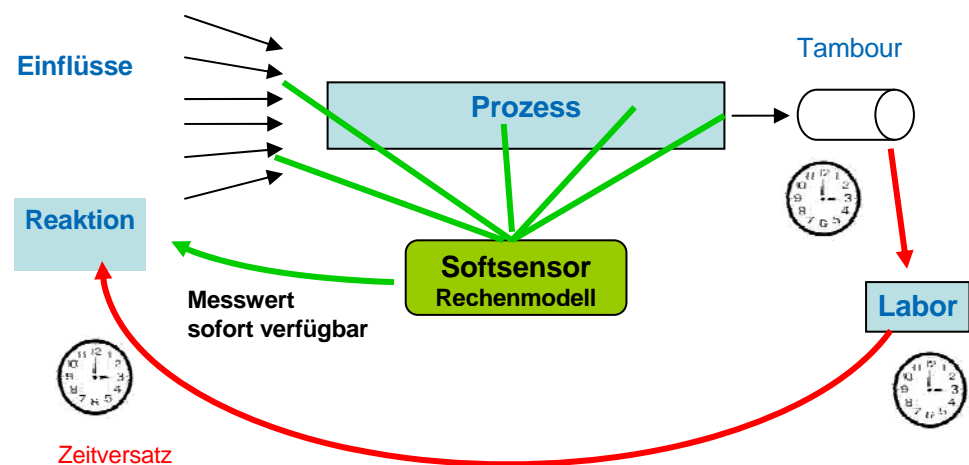


Abbildung 6: Einsatz Softsensor

Vorteile

Im Vergleich zur Messung im Labor stellt ein Softsensor einen Messwert wesentlich schneller, in der Regel in Echtzeit, zur Verfügung. Des Weiteren muss meist keine Probenvorbereitung durchgeführt werden. Es handelt sich hierbei um eine zerstörungsfreie Messung.

Ein Softsensor ist im Normalfall wesentlich preiswerter als ein adäquates direkt messendes Gerät, sofern ein solches überhaupt existiert.

Nachteile

Ein Softsensor nutzt zur Berechnung ein Modell, das auf Referenzwerten beruht. Dabei kann ein Modell maximal so gut sein wie das Verfahren mit dem die Referenzwerte erzeugt worden sind. Die Streuung der Referenzwerte beeinflusst also die Modellgüte.

Innerhalb des Softsensors werden verschiedene online verfügbare Informationen miteinander verknüpft. Um richtig arbeiten zu können, müssen alle diese Informationen jederzeit korrekt und verfügbar sein. Mit Hilfe von Ersatzwerten können einzelne fehlende Informationen möglicherweise kurzzeitig ersetzt werden, die Qualität des Sensorsignals wird aber im Normalfall darunter leiden. Im schlimmsten Fall ist gar kein verlässlicher Sensorwert verfügbar.

Anwendung in der Papierindustrie

Softsensoren werden immer häufiger auch in Papiermaschinen eingesetzt. Jüngste Implementierungen wurden zum Beispiel in [20] vorgestellt. Dort wurden Indizes für Berst-, Reiß- und Zugfestigkeit mittels adaptiver Modelle vorausgerechnet.

4.7 Modellbildung**Überblick**

Die Modellbildung bezeichnet ein wissenschaftliches Verfahren, die Wirklichkeit reduziert darzustellen um Zusammenhänge zu verdeutlichen. Mathematisch kann ein Modell durch die Matrixgleichung

$$Y = XB + E$$

beschrieben werden. Dabei sind Y die abhängigen Zielgrößen, X die unabhängigen Variablen, B die Abbildungsvorschrift und E die Residuen (Differenz zwischen realen und vorausgesagten Y-Werten). Die Modellbildung bezeichnet dabei das Verfahren, mit dem die Abbildungsvorschrift B erzeugt wird. Dafür können verschiedene lineare und nichtlineare Ansätze gewählt werden.

Nähere Untersuchungen zur Modellbildung und Validierung wurden in [21] zusammengefasst.

Lineare Ansätze

Zu den linearen Ansätzen zählen zum Beispiel folgende Verfahren:

- Gaußsches Eliminationsverfahren
- Hauptkomponentenanalyse (PCA)
- Partial Least Squares-Verfahren (PLS)

Nichtlineare Ansätze

Typische Vertreter für nichtlineare Ansätze sind zum Beispiel:

- Künstliche Neuronale Netze
- Nichtlineare Transformation der Eingangsgrößen
- Moment Combined PLS-Verfahren (MC-PLS)

Durch diese Ansätze können in der Realität auftretende Nichtlinearitäten in das Modell integriert werden. In diesen Fällen wird die Modellgüte gegenüber linearen Modellansätzen verbessert.

5 Konzept Modellbildung

Ausgangssituation

Die Versuche im Rahmen dieses Projektes wurden an der Versuchspapiermaschine im Technikum der Forschungsstelle durchgeführt.

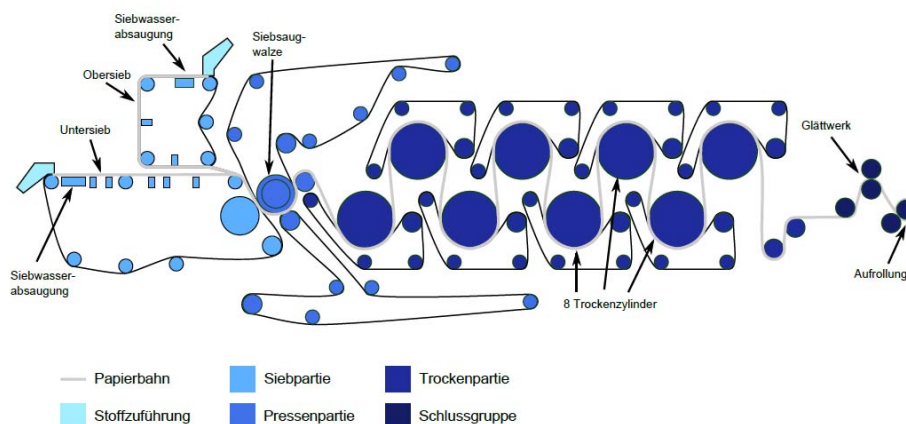


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Versuchspapiermaschine

Als Datenquellen existieren hier verschiedene Versuchsprotokolle, Aufzeichnungen der SPS (Steuer- und Messsignale, Handeingaben), Werte autonomer Messgeräte sowie Werte aus der Prüfung der Rohstoffe und gefertigten Papiere im Labor.

Vorgehen

Bei der Bearbeitung dieses Arbeitspaketes wurden alle möglichen Datenquellen untersucht, die bei der Papierherstellung an der Versuchspapiermaschine zur Verfügung stehen. Dabei wurde analysiert, ob, wie und in welcher Qualität die Daten anfallen. Anschließend wurden die Datenquellen bewertet hinsichtlich:

- bekannter Einfluss auf die INF
- Veränderbarkeit im Prozess / Versuchsplan
- Qualität und Quantität der Daten

Aufbauend auf dieser Analyse der Datenquellen wurden die Parameter für die Modellbildung ausgewählt. Dabei wurden ein minimaler und ein maximaler Parametersatz definiert. Für den optimalen Parametersatz wurde festgelegt, dass dieser im Rahmen einer Optimierung bei der Modellbildung bestimmt werden sollte.

Ergebnis

Als Ergebnis dieses AP entstand eine vollständige Auflistung aller Daten, die bei der Papierherstellung in der Forschungsstelle anfallen. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Parameter aus den verschiedenen Datenquellen mit ihrem Einfluss auf die INF aufgelistet. Eine vollständige Darstellung würde bei schon mehr als 150 verschiedenen Werten aus der SPS der Versuchspapiermaschine den Rahmen sprengen. Dabei sind dann allerdings auch Informationen über einzelne Ventile enthalten, die für die hier vorliegende Zielstellung nicht relevant sind.

Tabelle 2: Wichtigste Parameter mit Einfluss auf die INF

Parameter	Datenquelle	Einfluss auf die INF
Flächenmasse	FM-Sensor / Labor	Hoch
Trockengehalt	Labor / Rezeptur	Hoch
Anteil Füllstoff	Labor / Rezeptur	Hoch
Temperatur Stoff	Temperatursensor	Mittel
Formation	Kamera	Mittel
Faserlängenverteilung	Labor	Hoch

Des Weiteren wurden die Parameter für die Modellbildung festgelegt. Für den maximalen Datensatz wurden 42 verschiedene Parameter ausgewählt. Der minimale Datensatz sollte aus den folgenden vier Werten bestehen:

- Flächenmasse
- Trockengehalt
- Anteil Füllstoff
- Formation

6 Versuchsplanung und Organisation**Vorgehen**

Für die Versuchsplanung wurde ein Screening über die aktuellen praxisrelevanten Rezepturen für grafische Papiere (Kopierpapier + SC-Papier) durchgeführt. Daraus wurde ein Versuchsplan mit mehreren Stufen erstellt.

**Ergebnis
Versuchsplan**

Der Versuchsplan gliederte sich in drei Stufen. Dabei wurden Versuche für ein Kopierpapier mit 80g/m² und ein SC-Papier mit 56g/m² geplant.

In der ersten Stufe sollten folgende Parameter gezielt variiert werden:

- Flächenmasse: +/- 5g/m²
- Füllstoffgehalt SC-Papier: 35 – 45 %
- Füllstoffgehalt Kopierpapier: 25 – 35 %
- 2 verschiedene typische Additive (Percol, Bentonite)
- Langfaseranteil: 80% oder 100%
- Trockengehalt: 40 – 55

Des Weiteren sollten zufällige und unabhängige Änderungen der Maschinenpa-

parameter vorgenommen werden um einerseits die Formationsausbildung zu beeinflussen und andererseits Variationen in den Prozessparametern zu erreichen.

Für die zweite Stufe sollten begleitende Messungen bei Versuchen stattfinden, die im Rahmen anderer Projekte an der Versuchspapiermaschine der Forschungsstelle durchgeführt wurden. Für die Auswahl der zu begleitenden Versuche wurden Grenzwerte für die verschiedenen Parameter definiert.

In der dritten Stufe wurde aufbauend auf den Ergebnissen der ersten Stufen eine Variation folgender Parameter festgelegt:

- Flächenmasse: +/- 5g/m²
- Füllstoffgehalt SC-Papier: 35 – 45 %
- Trockengehalt: 40 – 55

Ergebnis neue Messtechnik

Zur Online-Bildgewinnung am Stoffauflauf der Papiermaschine wurde eine Industriekamera samt Beleuchtung ausgewählt, die auch unter den dort herrschenden Bedingungen stabil eingesetzt werden kann. Deshalb war eine entsprechende Umhausung zum Schutz vor allem gegen Feuchtigkeit notwendig. Des Weiteren mussten niedrige Belichtungszeiten realisierbar sein, da sonst bei der Bewegung des Siebes Bewegungsunschärfen entstehen würden.

Zur Online-Messung der Temperatur der Papierbahn wurde ein System mit fünf Messsonden ausgewählt. Auch hier musste die entsprechende Schutzklasse beachtet werden. Des Weiteren musste ein System gewählt werden, das in dem geringen Platzangebot der Versuchspapiermaschine mechanisch integriert werden konnte.

Auf die technischen Details zu der neuen Messtechnik wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

7 Vorbereitung Datenaufnahme

Vorgehen

Zur technischen Vorbereitung der Versuche wurden in diesem AP die Inbetriebnahme und der Test der neuen Messtechnik durchgeführt. Dafür musste in gezielten Versuchen die bestmögliche Positionierung und Parametrierung gefunden werden.

Des Weiteren wurde für die Prozess- und Messinformationen eine Datenstruktur vorbereitet, die im Rahmen der folgenden Arbeitspakete mit Informationen gefüllt wurde. Zur Vermeidung von Fehlern wurde die Datenübernahme aus den verschiedenen Datenquellen (PLS, Messgeräte, Rezepturinformationen, etc.) weitgehend automatisiert. Die dafür notwendigen Übernahmewege wurden vorbereitet, so weit als möglich als Software programmiert und getestet.

7.1 Vorbereitung Online-Bildgewinnung

Ausgewählte Hardware

Durch die bildliche Erfassung von Prozessabschnitten wird eine weitere Möglichkeit zur Informationsgewinnung am Prozess geschaffen. Durch den raschen Anstieg der Leistungsfähigkeit der Rechentechnik ist es mittlerweile möglich, die am Prozess erfassten Bilder sofort auszuwerten und deren Informationen für ein Online-Prozessmodell oder eine Prozesssteuerung zu integrieren.

Die Framerate einer Kamera spielt für die Bildaufnahme am Stoffauflauf eine signifikante Rolle. Aus diesem Grund wurde eine Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)-Kamera eingesetzt. Der Grund für die höhere Geschwindigkeit der CMOS-Sensoren liegt in deren physikalischen Aufbau. Im Gegensatz zu den Charge-Coupled Device (CCD)-Sensoren, bei welchen die lichtempfindlichen Elemente reihenweise geschoben und anschließend Element für Element ausgelesen werden, wird bei den CMOS-Sensoren jedes Element einzeln adressiert und mit einer eigenen Ansteuereinheit ausgelesen.

Der vorteilhafte technologische Aufbau bedingt einige Nachteile, wie eine weniger ausgeprägte Uniformität und Rauschen im Bild. Allerdings ist mit der derzeitigen Entwicklung der CMOS-Technologie eine Marginalisierung der optisch-qualitativen Vorteile gegenüber den CCD-Sensoren zu beobachten.

Einbau der Sensorik

Die Kamera und die Beleuchtung wurden an der Papiermaschine mit Standard-Aluminiumprofilen befestigt. Dieser variable Aufbau erlaubte eine einfache Einstellung von verschiedenen Einbaupositionen. Der prinzipielle Einbau ist in der folgenden Abbildung veranschaulicht.

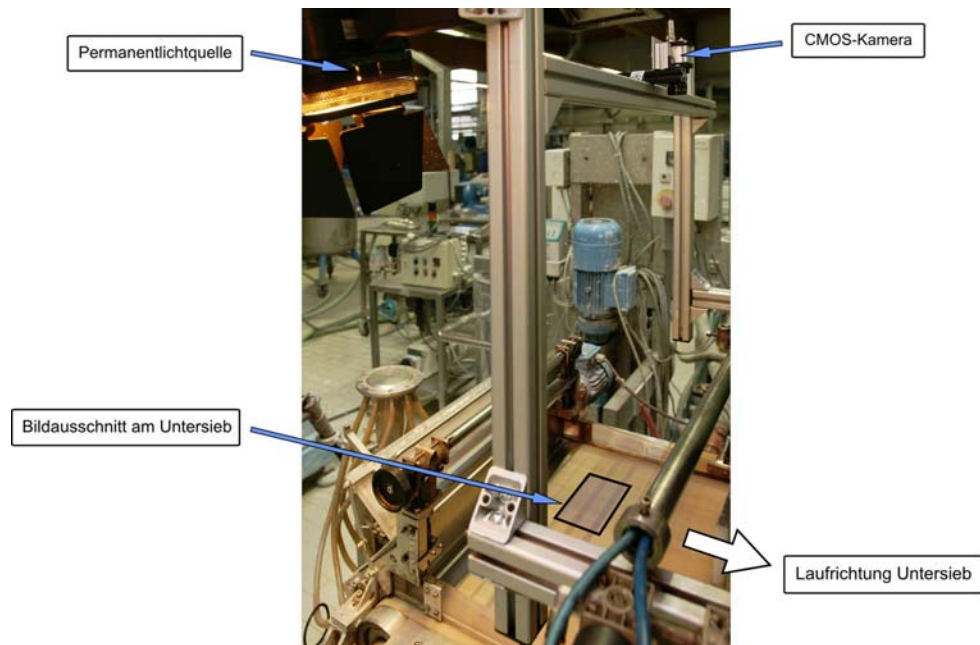


Abbildung 8: Einbauposition der Kamera und Beleuchtung zur Online-Bildgewinnung

Software zur Ansteuerung

Zur Online-Bildgewinnung wurde eine Software (siehe Abbildung) programmiert, die in einem einstellbaren Intervall automatisch ein Bild aufnimmt und dieses auf der Festplatte archiviert.

Für die Versuche wurde ein Intervall von 30 Sekunden eingestellt. Zusätzlich wurde im Programmfenster jederzeit ein Livebild angezeigt, sodass dem Maschinenpersonal eine zusätzliche Überwachungsmöglichkeit des Prozesses an die Hand gegeben wurde.

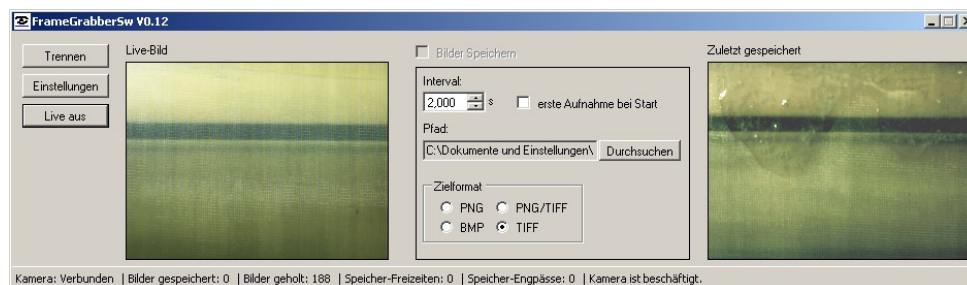


Abbildung 9: Programmoberfläche zur Online-Bildgewinnung

Ergebnisse Vorversuche

Im Rahmen der Inbetriebnahme wurde ein optimaler Abstand der Kamera zur Papierbahn eingestellt. Dieser Abstand ist dabei immer ein Kompromiss. Größere Abstände bedeuten größere Bilder und damit Informationen über einen größeren Bereich des Papiers; kleine Abstände führen zu einem höheren Detailgrad der Bilder.

Für die Versuche wurde ein Abstand von 83 cm festgelegt. Dies führt zu einer Bildgröße von etwa 200 mm Länge und 150 mm Breite. Die Blende wurde auf Blendenstufe 5,6 geschlossen um einerseits ausreichend Tiefenschärfe zu erreichen und andererseits Beugungseffekte an der konstruktionsbedingt sehr kleinen Blendenöffnung zu vermeiden.

7.2 Vorbereitung Online-Messung der Bahntemperatur

Ausgewählte Hardware

Für die Temperaturmessung auf der Papierbahn wurde ein Spektral-Pyrometer ausgewählt, welches berührungsfrei und somit thermisch, wie auch mechanisch rückwirkungsfrei misst.

Der Sensor hat ein IP65-geschütztes Gehäuse und ist für Umgebungstemperaturen bis 180 °C ausgelegt. Er kann somit problemlos zwischen den Trockenzylindern installiert werden.

Weitere Details zum Sensor und dessen Funktionsumfang können dem Handbuch [22] entnommen werden.

Einbau der Sensorik

Die Temperatursensoren wurden an unterschiedlichen Orten in der Versuchspapiermaschine installiert. Der erste Sensor wurde dabei am ersten freien Zug positioniert, wo später dann die Proben für die Bestimmung der INF genommen

werden sollten. Ehre Messpunkte waren nicht erforderlich, da im Stoffzulauf ein fester Temperatursensor installiert war und bis zum ersten freien Zug keine größeren Temperaturveränderungen hervorgerufen werden. Mit den weiteren Sensoren kann der Trocknungsverlauf des Papiers verfolgt werden. Dieses hat zwar keinen Einfluss mehr auf die INF, kann aber zur prinzipiellen Charakterisierung des Papiers genutzt werden und hatte somit Potential für eine Modellbildung. Die genauen Einbauorte sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

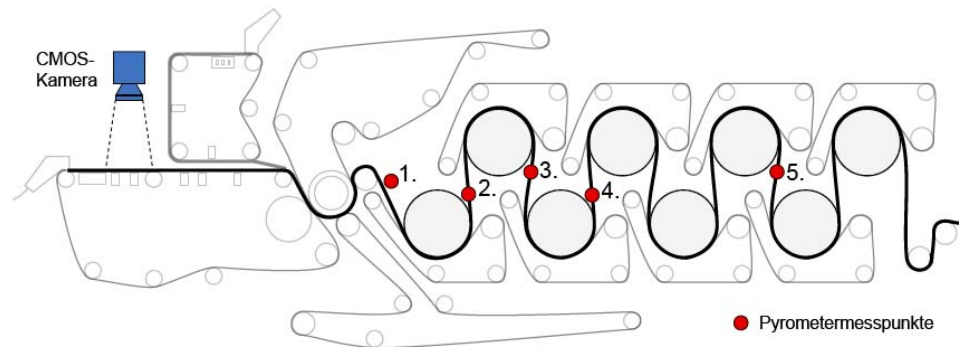


Abbildung 10: Messstellen der Temperatursensoren in der Versuchspapiermaschine

Software zur Ansteuerung

Zur Erfassung der Sensorwerte wurde eine Software erstellt, die in regelmäßigen zeitlichen Intervallen alle Sensoren abfragte und die Werte in einer Textdatei protokollierte. Die Erfassung der Werte erfolgte synchron mit der Aufnahme der Kamerabilder aller 30 Sekunden.

Ergebnisse Vorversuche

Im Vorfeld des festen Einbaus der Sensoren wurden verschiedene Tests zur Festlegung der Positionierung durchgeführt. Dabei ergaben sich teilweise recht deutliche Unterschiede. Besonders auffällig war dabei die Entfernung des Messortes vom Ablöseort der Papierbahn vom Trockenzylinder.

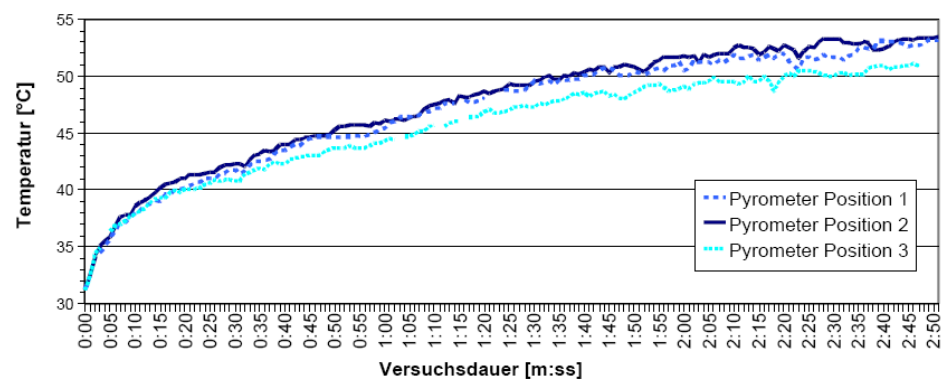


Abbildung 11: Messergebnisse bei verschiedenen Einbaupositionen

Als Konsequenz dieser Vorversuche wurde beim Einbau der Sensoren sehr genau darauf geachtet, dass alle fünf Sensoren in einer Spur im gleichen Abstand und Winkel zur Papierbahn positioniert wurden.

8 Aufbau der Datenbasis und Papieranalyse im Labor

Vorgehen	<p>Innerhalb dieser Arbeitspakete wurde in verschiedenen Versuchen Papier an der Versuchspapiermaschine der Forschungsstelle und einer Vergleichspapiermaschine hergestellt. Die Versuche wurden aufmerksam beobachtet und protokolliert. Anschließend wurden die Papiere im Labor ausführlich analysiert.</p> <p>Dabei wurde das vorher definierte Versuchsprogramm verwendet. Die Details zu den einzelnen Versuchen werden hier dargestellt.</p>
Aufbau der Datenbasis	<p>In der ersten Versuchsphase wurden 100 verschiedene Papiere hergestellt. Die Eckpunkte aus dem Versuchsprogramm konnten alle realisiert werden.</p>
Erweiterung der Datenbasis	<p>Im Rahmen der Beobachtung weiterer Versuche konnten zusätzlich Daten zu 70 verschiedenen Papieren erfasst werden. Dabei wurden nur Versuche in die Datenerfassung integriert, bei denen alle Parameter innerhalb der Maximalwerte lagen, die in der ersten Versuchsphase aufgetreten waren.</p>
Vergleichsversuche	<p>Im Rahmen der Vergleichsversuche wurden 30 verschiedene Parametervariationen an einer schnelleren Vergleichspapiermaschine durchgeführt. Die Versuche wurden erfolgreich durchgeführt und konnten in die Datenbasis integriert werden.</p>
Papieranalyse im Labor	<p>Die Papiere durchliefen das Standardprogramm im Labor. Dabei wurden u.a. folgende Werte bestimmt:</p> <ul style="list-style-type: none">• Flächenmasse• Asche• Dicke• Anteil Wasser bei Normklima• INF <p>Bei der Bestimmung der INF wurde eine besondere Arbeitsanweisung für das Laborpersonal formuliert, da die Werte für die Modellbildung als Referenzwerte genutzt werden sollten. So wurde zum Beispiel besonders darauf geachtet, dass von den Probenahmen bis zur Prüfung keine unnötigen mechanischen Beanspruchungen auf die Proben Einfluss nehmen konnten. Die Probestreifenanzahl zur Bestimmung des Mittelwertes wurde im Rahmen dieses Projektes auf fünf erhöht.</p> <p>Durch dieses Vorgehen konnte die Anzahl der Ausreißer bei der Bestimmung der INF drastisch reduziert werden. Auch die Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert waren geringer als sonst üblich.</p>

Messwerte der INF

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden von 200 verschiedenen Papieren Werte für die INF bestimmt. Dabei wurden folgende statistische Kenngrößen festgestellt:

- Mittelwert der INF: 3,45 N
- Minimum der INF: 1,37N
- Maximum der INF: 11,3 N
- Standardabweichung: 1,47 N

Die einzelnen Werte sind in der folgenden Abbildung ersichtlich.

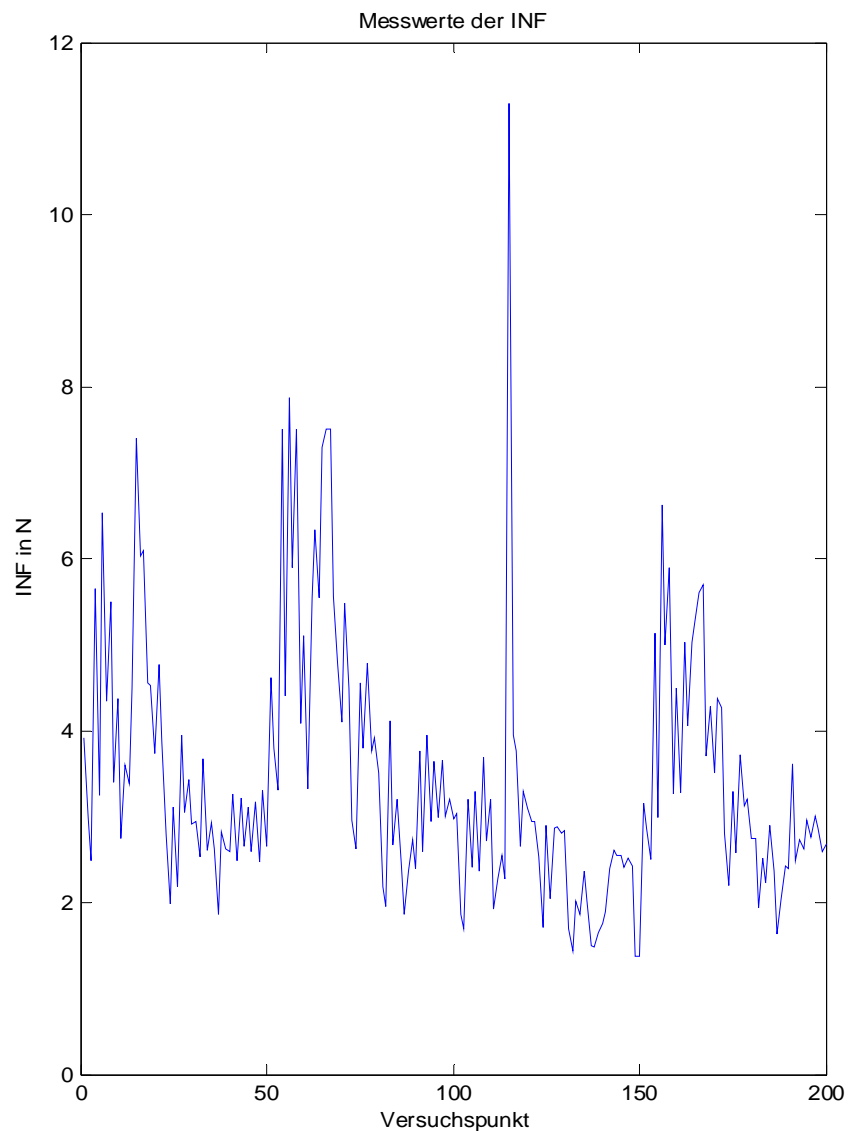


Abbildung 12: Messwerte der INF - Vollständige Datenbasis

9 Modellbildung

Vorgehen Die Modellbildung unterteilt sich in die Einzelschritte:

- Datenvorverarbeitung
- Korrelationsanalyse
- Modellbildung und –validierung

Das Vorgehen und die Ergebnisse werden in den nächsten Kapiteln im Detail vorgestellt.

9.1 Datenvorverarbeitung

Vorverarbeitung der Zeitreihendaten Die Zeitreihendaten wurden aus den Versuchsplänen, den Exportdateien der SPS und den Loggerdateien zusätzlicher Messgeräte in ein einheitliches Datenformat umgewandelt. Alle Zeitreihen wurden an ein 5-Minuten-Raster angepasst. Versuchsbezogene Qualitätsgrößen wurden dem vorhergehenden Rasterpunkt zugeordnet.

Die Daten wurden mittels Häufigkeitsverteilungen und Trenddarstellungen auf Ausreißer geprüft. Invalide Einzeldaten und Zeitbereiche instabiler Produktion wurden entfernt. Ursachen ungewöhnlicher Werte wurden mit dem Maschinenpersonal geklärt.

Transferzeiten Transferzeiten im Prozess wurden über Volumina und Volumenströme der Stofflinien entlang des Stoffweges berechnet. Als zeitlicher Bezugspunkt wurde der erste freie Zug gewählt, an dem die Muster für die Papierprüfung aus dem Prozess entnommen werden, so dass den Papierqualitätsgrößen keine Transferzeit zuzuweisen war.

Tabelle 3: Berechnete Transferzeiten (Ausschnitt)

Ort/Zulauf	Zeit bis Poperoller in min
Stoffauflauf	0,2
Mischbütte	21,6

Nach den Erfahrungen der Forschungsstelle [23] ist die physikalische Berechnung von Transferzeiten aus Volumina und Stoffströmen zuverlässiger auswertbar als Sprungeffekte in den Zeitreihen oder eine Kreuzkorrelationsanalyse.

**Zeitversetzte
Mittelwertbildung**

Die einzelnen Prozessdaten-Zeitreihen wurden folgend in ihrem Zeitbezug über die berechneten mittleren Transferzeiten verschoben, damit Ursachen und Folgen innerhalb der Datenzeilen einander zugeordnet sind.

Daraus wurden zwei Tabellen erstellt:

- Prozessdatentabelle: Raster 5 min, ca. 3000 Datenzeilen. Einzelne Parameter wiesen eine geringere Datendichte auf.
- ZvM-Tabelle: Zuordnung von Prozess- und Qualitätsleitsystem-Daten, Daten aus zusätzlichen Messgeräten sowie Labordaten zu den validen INF-Messwerten; Raster unregelmäßig mit Unterbrechungen, 200 Datenzeilen

Für die ZvM-Tabelle wurde eine zeitversetzte Mittelwertbildung durchgeführt. Für jeden Parameter wurde dabei neben der Transferzeit zum Poperoller auch eine Zeitspanne zur Mittelwertbildung definiert, um der Streuung der Stofftransferzeit Rechnung zu tragen, statistische Einzelmessfehler auszumitteln und den Verlust von Datensätzen durch einzelne fehlende Werte zu verringern.

9.2 Korrelationsanalyse

Vorgehen

Eine Korrelationsmatrix diente dazu, Zusammenhänge innerhalb der Prozessdaten und Korrelationen mit der INF aufzuzeigen.

Für die paarweise Korrelation wurden die Pearson-Korrelationskoeffizienten R berechnet, in einer Matrix dargestellt und nach Stärke der Korrelation zusätzlich farblich hinterlegt (von $R=1$: rot, stark positive Korrelation über $R=0$: farblos, keine Korrelation zu $R=-1$: blau, stark negative Korrelation). Auch wurden die Irrtumswahrscheinlichkeiten p berechnet.

Korrelationsmatrix

Die folgende Abbildung gibt einen Auszug der Korrelationen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,01$ wieder.

$p < 0,01$	Euka	TMP	Feuchte Aufrollung rechnerisch	Flächenmasse klimatisiert	Flächenmasse otro	Anteil Faserstoff otro	Anteil Füllstoff otro	Stoffdichte Ganzstoff Stoffauflauf	Gesamretention	Retention Füllstoff aus Konstantteil	Arbeitsgeschwindigkeit	Flow Rate Ist	Staubsauger 4	Temperatur Zylinder 3	Temperatur Zylinder 4	Temperatur Zylinder 5	Temperatur Zylinder 8	Linienruck Glättwerk	Staub MW	Formation-Wolkgkeit	Trockengehalt
Euka	-1,00	-0,42	0,99	0,99	0,96					-0,24	-0,99	0,55	1,00	-1,00	-0,77	0,42	-0,42	-1,00	-0,81	0,92	
TMP	-0,42	1,00	0,42	-0,99	-0,99	0,96				0,24	-0,99	-0,55	-1,00	1,00	0,77	-0,42	0,42	1,00	0,81	-0,92	
Feuchte Aufrollung rechnerisch	0,99	-0,42	1,00	-0,36	-0,36	-0,25	-0,36	-0,27		0,38	0,39	-0,42	0,42	0,19	-0,37	0,37	0,42	0,23	-0,45		
Flächenmasse klimatisiert	0,99	-0,99	-0,36	1,00	0,97	0,98				-0,18	-0,97	0,59	0,99	-0,99	-0,78	0,39	-0,38	-0,99	-0,80	0,91	
Flächenmasse otro	0,99	-0,99	-0,34	1,00	0,97	0,98				-0,97	0,60	0,99	-0,99	-0,78	0,38	-0,38	-0,99	-0,79	0,90		
Anteil Faserstoff otro	0,96	-0,96	-0,25	0,97	0,98	1,00				-0,95	0,68	0,96	-0,96	-0,79	0,34	-0,34	-0,96	-0,80	0,89		
Anteil Füllstoff otro			-0,36			-0,22	1,00			-0,18	-0,37		-0,47								0,18
Stoffdichte Ganzstoff Stoffauflauf			-0,27				0,28	1,00		0,69	-0,26										
Gesamretention							-0,18	0,69	1,00	0,44	0,24						-0,23	0,23			
Retention Füllstoff aus Konstantteil	-0,24	0,24	0,38	-0,18			-0,37	-0,26	0,44	1,00	0,31	0,40	-0,24	0,24		-0,32	0,32	0,24	0,24		
Arbeitsgeschwindigkeit	-0,99	0,99	0,39	-0,97	-0,97	-0,95				0,31	1,00		-0,99	0,99	0,76	-0,42	0,42	0,99	0,80	-0,90	
Flow Rate Ist	0,55	-0,55		0,59	0,60	0,68	-0,47			0,24	0,40	1,00		0,55	-0,55	-0,55					
Staubsauger 4	1,00	-1,00	-0,42	0,99	0,99	0,96				-0,24	-0,99	0,55	1,00	-1,00	-0,77	0,42	-0,42	-1,00	-0,81	0,92	
Temperatur Zylinder 3	-1,00	1,00	0,42	-0,99	-0,99	-0,96				0,24	-0,99	-0,55	-1,00	1,00	0,77	-0,42	0,42	1,00	0,81	-0,92	
Temperatur Zylinder 4	-0,77	0,77	0,19	-0,78	-0,78	-0,69				0,31	0,40	0,55	-0,77	0,77	0,19	-0,25	0,25	-0,77	0,59	-0,76	
Temperatur Zylinder 5	0,42	-0,42	-0,37	0,39	0,38	0,34				-0,23	-0,32	-0,42	0,42	-0,42	-0,25	-1,00	-0,42	-0,39	0,28		
Temperatur Zylinder 8	-0,42	0,42	0,37	-0,39	-0,38	-0,34				0,23	0,32	0,42	-0,42	0,42	-0,25	-1,00	0,42	0,39	-0,28		
Linienruck Glättwerk	-1,00	1,00	0,42	-0,99	-0,99	-0,96				0,24	-0,99	-0,55	-1,00	1,00	0,77	-0,42	0,42	1,00	0,81	-0,92	
Staub MW	-0,81	0,81	0,29	-0,80	-0,79	-0,80				0,24	0,80	-0,32	-0,81	0,81	0,59	-0,39	0,39	0,81	0,73	-0,73	
Formation-Wolkgkeit	0,92	-0,92	-0,45	0,91	0,90	0,89				-0,90	0,88	0,92	-0,92	0,92	0,76	-0,28	-0,28	-0,92	-0,76	0,76	
Trockengehalt							0,18														
INF	0,57	-0,57		0,59	0,59	0,64	-0,29				-0,56	0,48	0,57	-0,57	-0,41	0,28	-0,28	-0,57	-0,60	0,47	0,40

Abbildung 13: Korrelationsmatrix (Ausschnitt); Pearson-Korrelationskoeffizienten mit Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,01$, Datenbasis: ZvM-Tabelle

Diskussion

Es zeigen sich einige auf den ersten Blick plausible Korrelationen:

- INF mit der Flächenmasse ($R = 0,59$)
- INF mit dem Anteil Faserstoff ($R = 0,64$)

Andere Korrelationen sind erst aus der Prozessführung heraus erklärbar, so z. B. die negative Korrelation zwischen der INF und der Arbeitsgeschwindigkeit.

VIF-Auswertung: Vorgehen

Zusammenhänge innerhalb des Datensatzes wurden weiter in Anlehnung an das Verfahren des Varianzinflationsfaktors (Variance Inflation Faktor, VIF) untersucht. Das Verfahren dient zum Screening und zur Prüfung auf Multikollinearität; eine gezielte Modellbildung erfolgte im Anschluss.

Ein Parametersatz wurde ausgewählt, der keine trivialen paarweisen Korrelationen enthält. Beispielsweise wurde der Anteil Kurzfasern herausgenommen, da er mit dem Anteil an Langfasern zu -100% korreliert.

Dann wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 von linearen Regressionen berechnet, bei dem jeder Parameter jeweils durch alle anderen Parameter als Regressoren modelliert wird. Der Varianzinflationsfaktor nach $VIF = 1 / (1 - R^2)$ wurde nicht berechnet, da das Bestimmtheitsmaß ein verbreitetes Gütemaß ist und der VIF keine weitere Information enthält.

VIF-Auswertung: Ergebnis

Mit $R^2 = 0,76$ bis $0,98$ ließen sich alle Parameter innerhalb der Auswahl gut bis sehr gut aus den anderen verwendeten Parametern modellieren. Die damit belegte hohe Multikollinearität ist für einen geregelten Produktionsprozess typisch. Sie erschwert die kausale Interpretation von datenbasierten Auswertungen.

9.3 Modellbildung

Vorgehen Innerhalb der Modellbildung wurde die aufbereitete Datenbasis mit 200 Datensätzen verwendet.

Ziel war die Modellierung der INF. Als Referenzwerte wurden die Mittelwerte verwendet der Prüfungen verwendet. Eine Verwendung der Minimalwerte wurde getestet, erbrachte aber qualitativ keine anderen Ergebnisse.

Die Modellbildung wurde mit dem minimalen und dem maximalen Parametersatz durchgeführt. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt näher dargestellt.

Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurde eine Analyse durchgeführt, welcher Parametersatz die optimalen Vorhersageergebnisse erzielen konnte. Dazu wurden einerseits schrittweise einzelne Parameter aus dem maximalen Datensatz entfernt. Andererseits wurden einzelne Parameter im minimalen Datensatz ersetzt und / oder hinzugefügt.

Modellbildung mit maximalem Parametersatz

Im AP1 wurden 42 Parameter für den maximalen Parametersatz definiert. Innerhalb der Versuche wurden allerdings nicht alle Parameter variiert, sodass sich für einzelne Parameter nur ein konstanter Wert in den Datensätzen feststellen ließ. Ein solcher Parameter kann für die Modellierung leider nicht genutzt werden. Des Weiteren wurden Werte, die sich auseinander berechnen ließen aus dem Parametersatz eliminiert. Durch diese Maßnahmen reduzierte sich der maximale Datensatz auf 31 relevante Informationen, was allerdings für die Menge an Versuchen mehr als ausreichend ist. Für das Modell besteht sogar in hohem Maße die Gefahr eines Overfittings.

Für die Modellierung wurden alle Parameter einem „Autoscaling“-Verfahren unterzogen um die verschiedenen Werteneiveaus aneinander anzugleichen und später die Einflüsse der Parameter miteinander vergleichen zu können.

Folgende statistische Informationen wurden bei der Modellierung erreicht:

- Anzahl Datensätze: 200
- Anzahl Inputs: 31
- Modellverfahren: PLS, Autoscale, Crossvalidation
- RMSEC: 0,89
- RMSECV: 0,94

In der folgenden Grafik sind die berechneten Werte für die INF den real gemessenen Werten gegenübergestellt. Die idealen Werte würden sich direkt auf der schrägen Linie befinden.

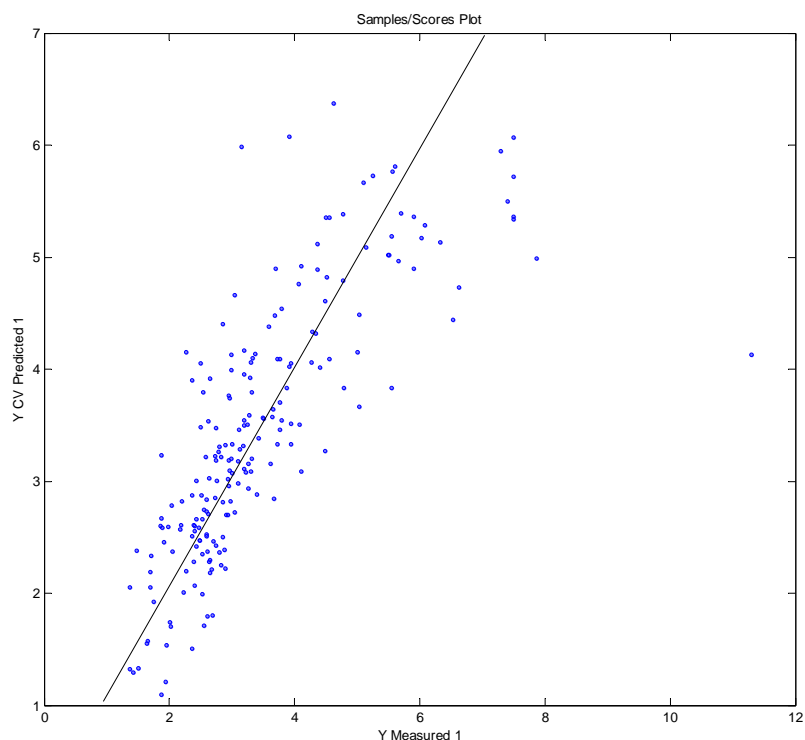


Abbildung 14: Vergleich gemessene und berechnete Werte für die INF mit dem maximalen Parametersatz

Modellbildung mit minimalem und optimalem Parametersatz

Anschließend wurde eine Modellierung mit dem minimalen Parametersatz durchgeführt.

Auch für diese Modellierung wurden alle Parameter einem „Autoscaling“-Verfahren unterzogen um die verschiedenen Werteniveaus aneinander anzugleichen und später die Einflüsse der Parameter miteinander vergleichen zu können.

Folgende statistische Informationen wurden bei der Modellierung erreicht:

- Anzahl Datensätze: 200
- Anzahl Inputs: 4 (Trockengehalt, Formation-Wolkigkeit, FM, Füllstoffanteil)
- Modellverfahren: PLS, Autoscale, Crossvalidation
- RMSEC: 0,97
- RMSECV: 0,99

In der folgenden Grafik sind die berechneten Werte für die INF den real gemessenen Werten gegenübergestellt. Die idealen Werte würden sich direkt auf der schrägen Linie befinden.

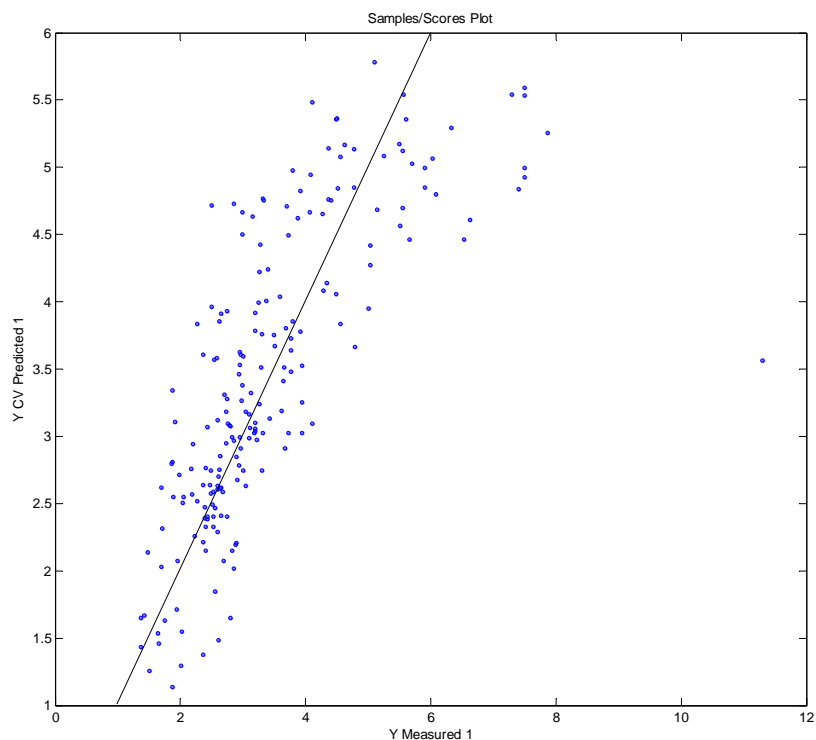


Abbildung 15: Vergleich gemessene und berechnete Werte für die INF mit dem minimalen Parametersatz

Anschließend wurde mit einem schrittweisen Optimierungsverfahren nach dem optimalen Parametersatz gesucht. Hierbei konnte keine wesentliche Verbesserung der Modellgüte gegenüber dem minimalen Parametersatz festgestellt werden. Einzelne Parameter konnten bei nur sehr geringen Güteveränderungen ersetzt werden, eine Erhöhung der Parameterzahl verschlechterte die Güte ebenso wie eine Verringerung der Parameteranzahl.

Im Vergleich zum maximalen Parametersatz ist die Güte bei dieser Modellvariante geringfügig schlechter, allerdings wesentlich robuster und dadurch im Online-Einsatz in jedem Fall vorzuziehen.

Validierung der Modellierung

Die Ergebnisse der Vergleichsversuche werden durch das Modell mit einer guten Qualität abgedeckt. Die Abweichungen sind systembedingt etwas größer als bei den Versuchen an der Versuchspapiermaschine, an der das Modell erstellt wurde.

Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse

Als Ergebnis der Modellierung stehen zwei verschiedene Modelle zur Online-Voraussage der INF zur Verfügung. Die Güte der Modelle ist gut und befindet sich im Bereich der Genauigkeit der Bestimmung der Referenzwerte für die INF im Labor.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse und Modellierung sind wie folgt zu bewerten: Die Multikollinearität im ausgewerteten Datensatz überlagert die Auswertbarkeit für die INF. Im Datenbestand sind die sortenbedingten Einstellungen maßgeblich für die Ausprägung der INF. Dem gegenüber lässt sich der Einfluss der Maschineneinstellungen nur mit geringer Signifikanz herausarbeiten.

Die Modelle wurden für zwei sehr einfache Stoffmodelle erstellt: ein Kopierpapier und ein SC-Papier. Eine Auftrennung in zwei separate sortenspezifische Modelle war nicht notwendig. Der Test ergab keine wesentliche Verbesserung der Modellgüte. Hier müsste in Zukunft noch geprüft werden, ob das Modell auch für weitere Papiersorten gültig ist, oder ob dann eine Auftrennung notwendig wird. Dazu werden allerdings wesentlich mehr Daten benötigt als im Rahmen des Projektes aufgenommen werden konnten.

10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Nutzen für kmU

Der Transfer der Ergebnisse des Forschungsprojekts wird dazu beitragen, die Wettbewerbsfähigkeit der unten genannten kmU direkt zu stärken und einigen von ihnen einen neuen Markt in der Papierindustrie zu erschließen.

Im Umfeld der Papierindustrie hat sich ein breiter Mittelstand angesiedelt, der als Zulieferer oder Kunde von der Effizienz und dem Fortbestehen der Papierindustrie in Deutschland abhängig ist.

Zuordnung

Die Forschungsergebnisse werden nutzbar

- in den Fachgebieten Mess-, Regel-, Automatisierungstechnik, Verfahrenstechnik, Produktion und Rohstoffen
 - in den Wirtschaftszweigen Papiergewerbe, Elektrotechnik, Maschinenbau und Dienstleistungsgewerbe
-

Nutzerkreis

Potenzielle kleine und mittlere Unternehmen, die die Projektergebnisse direkt nutzen können, sind:

- Anbieter von Automatisierungslösungen zur Prozesssteuerung
- Anbieter von Messtechnik (Kameras, NIR-Spektrometer, etc.)
- Hersteller von Spezialpapieren

Weiterhin können die Ergebnisse durch Papierfabriken, die grafische Papiere herstellen, genutzt werden.

Automatisierer Die auf Basis der Forschungsergebnisse zu entwickelnden Softwareprodukte, Softsensoren und Software zur Prozesskontrolle, haben durch ihren Beitrag zur Effizienzsteigerung der Papierherstellung und einen guten ROI sehr gute Marktchancen. Diese Produkte werden typischerweise von mittelständischen Herstellern entwickelt und verkauft. Besonders die ingenieurtechnische Leistung bei der Adaption an die konkreten Anlagenbedingungen erfordert hohe mittelstandstypische Flexibilität und bietet ein großes Marktpotential.

Messtechnikhersteller An der Papiermaschine werden die verschiedensten Messgeräte zur Prozessüberwachung bei der Neuprojektierung bzw. durch Nachrüstung zum Einsatz gebracht. Durch dieses Forschungsvorhaben wird eine weitere Anwendung dieser Technik aufgezeigt und dadurch der Wert der Messtechnik erhöht. Kaufentscheidungen zum Einsatz moderner Messtechnik werden positiv beeinflusst durch den unmittelbaren Bezug zu einer effektivitätsrelevanten Messgröße. Speziell Kameratechnik und NIR-Messtechnik werden in Deutschland von kmU angeboten.

Nutzen für Mess- und Automatisierungstechnik Folgendes Zahlenbeispiel soll die Umsatzerwartungen für die kmU-basierten Automatisierungsunternehmen und Messtechnikhersteller verdeutlichen:

Tabelle 4: Zahlenbeispiel für den kmU-Nutzen

Zahl interessierter Papierfabriken (in Europa)	20
Einzelpreis Softsensor (Hardware, Software, Umsetzung)	50.000 €
Zusätzliche Messtechnik (im Durchschnitt)	25.000 €
Umsatzerwartung insgesamt	1.500.000 €

Die zusätzliche Messtechnik ist dabei von der aktuellen Ausstattung der Papiermaschine und der gewünschten Genauigkeit der Voraussage abhängig.

Hersteller von Spezialpapieren Mit der Herstellung von Spezialpapieren, bei denen die Funktionen durch Zugabe funktioneller Additive zur Suspension erzeugt werden, gewinnt die Frage der INF auch für diese Produkte an Bedeutung. Diese Papierfabriken können die Projektergebnisse zur Sicherung der effizienten Produktion nutzen. Speziell die Zugabe von Festigkeit steigernden Additiven kann auf Basis der Messergebnisse minimiert werden.

Hersteller grafischer Papiere Die Hersteller grafischer Papiere nutzen die Ergebnisse des Projektes, um online einen Wert für die INF zu erhalten und diesen als Regelgröße zu verwenden. Auf Basis der Erkenntnisse wird es möglich gezielt Investitionen zur Verbesserung der Prozessüberwachung zu tätigen.

**Einschätzung der
Finanzierbarkeit
einer
anschließenden
industriellen
Umsetzung**

Der Nutzen für die Papierfabriken soll an einer beispielhaften Papiermaschine für Kopierpapier verdeutlicht werden. Ein typisches Szenario ist eine Geschwindigkeitsreduzierung um einen Abriss zu vermeiden. Dadurch verringert sich die Produktionsmenge, wodurch der Gesamtumsatz der Papierfabrik reduziert wird:

Tabelle 5: Zahlenbeispiel für die Umsatzsteigerung einer Papierfabrik

Geschwindigkeit normal	1400 m/min
Geschwindigkeit reduziert	1350 m/min
Bahnbreite	7 m
Flächengewicht	80 g/m ²
Normale Produktion pro Stunde	47,0 t
Reduzierte Produktion pro Stunde	45,4 t
Verkaufspreis Kopierpapier	700 €/ t
Umsatzreduzierung	1.176 €/ h
Annahme:	Jeden Tag 1 t Mehrproduktion
Umsatzsteigerung	255.500 €/ Jahr

Durch die online verfügbare Information über die INF könnte die Geschwindigkeit über kürzere Zeiträume oder in geringerem Umfang reduziert werden. Dadurch könnte die Produktionsmenge täglich um eine Tonne gesteigert werden. Im Jahr ergibt dies eine Umsatzsteigerung von ungefähr 250.000 Euro. Die oben aufgeführten Kosten für einen Softsensor und zusätzliche Messtechnik könnten also in circa 4 Monaten erwirtschaftet werden.

Ansprechpartner für weitere Informationen:

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

Papiertechnische Stiftung PTS
Institut für Zellstoff und Papier IZP
Pirnaer Straße 37
01809 Heidenau
Tel. (03529) 551-0
Fax (03529) 551-899
e-Mail: info@ptspaper.de
www.ptspaper.de

Literaturverzeichnis

- 1 N.N.
Statistische Kurzinformation
VDP, Bonn, 2009
<http://www.vdp-online.de/pdf/KurzinfoAllg.pdf>
- 2 M. Schwarz, K. Bechtel
Initiale Gefügefestigkeit bei der Blattbildung
Wochenblatt für Papierfabrikation 131, S. 3-9 (2003) Nr. 16
- 3 H. Berbner, Dr. G. Herbst, K. Ott, H. Zettler
Electro-insulating paper
EP0623936, 1997
- 4 M. Klein
Verbesserung der initialen Nassfestigkeit (INF) von deinkten Altpapierstoffen durch
Fasermodifizierung mittels festigkeitssteigernder Additive
PTS-Abschlussbericht, Heidenau, 2007
- 5 K. Erhard, J. Kretzschmar
Sicherung der Runnability von SC- und LWC-Papier bei kostenoptimaler Substitution von
Zellstoff durch deinkten Altpapierstoff
PTS-Abschlussbericht, Heidenau, 2007
- 6 F. Goedsche
Papiermaschine - Trockenpartie und Endgruppe
Papierherstellung für Quereinsteiger und Nichttechniker
München: PTS – Manuskript: PTS-MS 497 2004
- 7 H. Corte, H. Schaschek
Physikalische Natur der Papierfestigkeit
Das Papier 9, S. 519-530 (1955) Nr. 21/22
- 8 H. Berger, M. Laufmann, C. Kohl
Beeinflussung und Prognose der Eigenschaften von SC-Papieren durch Einsatz von Kaolinen
unterschiedlicher Morphologie
PTS-News 02-2008, München, 2008
- 9 E. Gruber
Chemische Technologie des Zellstoffs und Papiers
Vorlesungsskriptum, Darmstadt, 2007
- 10 N.N.
Papiermachen
VDP, Bonn
<http://www.vdp-online.de/pdf/Papiermachen.pdf>
- 11 R.Mayer, U.Joos
ProRelease+ Schonende Bahnabnahme
Voith Paper, Heidenheim, 2005
- 12 ZELLCHEMING-Merkblatt VI/1/66
Prüfung von Holzstoffen S. 6 (1966)
- 13 SCAN-M 11:77 (1977)
Pulps, Initial Wet Web Trensile Strength, Stretch and Tensile Energy Absorption;
25 per cent dry matter content

- 14 SCAN-M 12:77 (1981)
Initial Wet Web Tensile Strength, Stretch and Tensile Energy Absorption after Wet Pressing;
35 per cent dry matter content
- 15 J. Koin
WetEnd Sensorik für alle Anwendungsfälle durch modulares Konstruktionsprinzip
Vortrag, Fachtagung für Prozessoptimierung und Analysentechnik, Potsdam, 2008
- 16 B. Zimmermann
Formation online
PTS-Abschlussbericht, Heidenau, 2009
- 17 P. Plew
Schnelle Kontrolle der Festigkeiten und anderer Eigenschaften von Druckpapieren
PTS-Abschlussbericht, Heidenau, 2007
- 18 E. Pigorsch
Retentionsbewertung durch spektroskopische Quantifizierung von Inhaltsstoffen nach zeitnaher
Aufbereitung von Suspensionsproben
PTS-Abschlussbericht, Heidenau, 2007
- 19 G. Kloppner
Kontinuierlich Prozesse optimieren
CAV Ausgabe 03/2002
- 20 T. Kokko, L. Tian, T. Harju
Neue Möglichkeiten für die Regelung und Optimierung von Papier- und Kartonmaschinen
Vortrag, Zellcheming Hauptversammlung, Wiesbaden, 2008
- 21 T. Kuntzsch
Validierung und Kalibrierung von Modellen zur Prognose von Stoff suspensions- und
Papiereigenschaften in Unternehmen der Papierindustrie
PTS-Abschlussbericht, Heidenau, 2009
- 22 N.N.
Infrarotsensoren - Bedienungsanleitung thermoMETER CT/CTF/CTH/CTM-1/CTM-2/CTM-3.
Micro-Epsilon, 2010.
<http://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--thermoMETER-CT--de.pdf>
- 23 Dietz W.
Modellgestützte Optimierung von Retention und Formation im Wet End von
Papierherstellungsanlagen
PTS-Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben IGF 14701 N, München 2008,
www.ptspaper.de