

# Verfahren zur Ausschussverminderung in der Papierindustrie

Entwicklung eines Verfahrens, das erstmals so frühzeitig die Qualität in der Papierproduktion sichert, dass Ausschuss vermindert wird (schont Ressourcen, stärkt Wirtschaftlichkeit)

W. C. Altenstrasser, P. Achatz, G. Schaffar

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**28/2008**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

# Verfahren zur Ausschussverminderung in der Papierindustrie

Entwicklung eines Verfahrens, das erstmals so  
frühzeitig die Qualität in der Papierproduktion  
sichert, dass Ausschuss vermindert wird  
(schont Ressourcen, stärkt Wirtschaftlichkeit)

DI Wolfgang C. Altenstrasser, Dr. Paul Achatz  
(Neusiedler AG) Mondi Business Paper Services AG

Dr. Gottfried Schaffar  
Forschungsinstitut für technische Physik

Fachhochschule Wr. Neustadt, Standort Tulln

Ulmerfeld-Hausmening, Juli 2008

**Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie**



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage [www.FABRIKderZukunft.at](http://www.FABRIKderZukunft.at) und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Kurzfassung Deutsch.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2. Kurzfassung Englisch.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3. Danksagung.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4. Kurzbeschreibung des Aufbaus des Endberichtes.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Ziele des Projektes.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Allgemeine Einführung in die Thematik.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Mechanische Papiereigenschaften.....</b>	<b>12</b>
3.1.1. Flächenbezogene Masse, Flächengewicht, Grammaturn.....	12
3.1.2. Dicke und Volumen.....	12
3.1.3. Festigkeitseigenschaften.....	13
3.1.4. Steifigkeiten.....	13
3.1.5. Papierwölbung, Curl, Diagonalität.....	14
<b>3.2. Konventionelle Papierprüfung und ihre Grenzen.....</b>	<b>14</b>
3.2.1. Klima und Papier.....	15
3.2.2. Die Messung von Dicke und Volumen.....	17
3.2.3. Die Messung der statischen Festigkeitseigenschaften.....	17
3.2.4. Die Messung der dynamischen Festigkeitseigenschaften.....	18
3.2.5. Die Messung der Steifigkeiten.....	18
3.2.6. Die Bestimmung von Wölbung, Curl und Diagonalität.....	19
<b>3.3. Einflussfaktoren auf die relevanten Papiereigenschaften.....</b>	<b>20</b>
3.3.1. Einflüsse des Fasermaterials.....	20
3.3.2. Einflüsse der Faserstoffausbereitung.....	20
3.3.3. Einflüsse der Blattbildung.....	21
3.3.4. Einflüsse der Trocknung.....	22
3.3.5. Ausschuss und interne Wiederaufbereitung.....	23
<b>4. Inhalte des Projektes.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1. Die Messung der Papierverformung.....</b>	<b>23</b>
4.1.1. Der LaBaCuS als Ausgangspunkt.....	23
4.1.2. Steigerung der Präzision des Curl-Messgerätes (MoMiLa).....	24
<b>4.2. Zusammenhang zwischen Curl und Papierspannungen.....</b>	<b>25</b>
4.2.1. Die „Tension-Toy“ Software.....	26

<b>4.3. Lösungsansätze zur Früherkennung von Papierverformungen .....</b>	<b>27</b>
4.3.1. Suspensionsdickenmessungen .....	30
4.3.2. Die Auftrefflinie des Strahles am Sieb .....	32
4.3.3. Geschwindigkeitsmessungen an der Suspension .....	33
<b>4.4. Die Eule (OWL – Optical Wire Section Lookout).....</b>	<b>35</b>
4.4.1. Vorbemerkungen .....	35
4.4.2. Technische Grundlagen.....	36
4.4.3. Das Messprinzip .....	37
4.4.4. Das Korrelationsverfahren .....	39
4.4.5. Das Glitzerverfahren.....	40
4.4.6. Das Messgerät.....	44
<b>5. Ergebnisse.....</b>	<b>46</b>
<b>5.1. Vorhersage der Wölbungsdefekte.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2. Wirtschaftliche Bedeutung .....</b>	<b>49</b>
<b>5.3. Ausblick.....</b>	<b>50</b>
<b>6. Angaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie .....</b>	<b>51</b>
<b>7. Anhang.....</b>	<b>53</b>
<b>7.1. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>53</b>
<b>7.2. Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>53</b>
<b>7.3. Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>54</b>
<b>7.4. Die Sensoren .....</b>	<b>55</b>
<b>7.5. Patentierungsantrag .....</b>	<b>57</b>
<b>7.6. Projektlogo .....</b>	<b>58</b>





# 1. Einleitung

## 1.1. Kurzfassung Deutsch

Das gegenständliche Projekt war Teil eines größeren Projektes von Mondi Business Paper, das die nachhaltige Qualitätsverbesserung von Bürokommunikationspapieren und Druckpapieren hinsichtlich ihrer Planlage zum Ziel hatte.

Für jeden Druckvorgang und die nachfolgenden Verarbeitungsschritte ist es notwendig, dass das Papier eine exakt definierte und möglichst unveränderbare Form hat und diese auch beibehält. Beginnt sich das Papier durch äußere oder innere Kräfte in seiner Form zu verändern, so kann das einerseits Auswirkungen auf die Qualität des Druckes und andererseits auf die Weiterverarbeitung haben und diese in bestimmten Fällen sogar unmöglich machen. Deswegen gilt die sogenannte Dimensionsstabilität des Papierblattes als wesentliches Qualitätskriterium für den weiterverarbeitenden Kunden, die Qualitätssicherung, die Fertigung, das Marketing, usw.

Das Gesamtkonzept sah zunächst vor, solche Dimensionsänderungen exakt messbar zu machen, vor allem weil bisherige Methoden der Messung zu subjektiv und zu wenig reproduzierbar waren. Dieser Teil wurde bereits vor dem Beginn dieses Projektes bearbeitet und mit dem Messgerät LaBaCuS realisiert. Dieses Verfahren ist mittlerweile patentiert und in der ÖNORM A 1105 verankert.

Als zweiter Teilschritt wurde ein Verfahren gesucht, das die Verformungen eines Papierblattes in direkten Bezug zu Spannungen im Blattgefüge setzen kann. Dieser Arbeitsschritt wurde in der „Tension-Toy“ Software umgesetzt. Wir sind damit in der Lage, ein deformiertes Blatt zu vermessen und dabei die ursächlich vorhandenen Spannungen grafisch sichtbar zu machen.

Der Hauptabschnitt des Gesamtprojektes bestand darin, jene Einflussfaktoren während der Fertigung zu identifizieren und quantifizierbar zu machen, die zu Verspannungen im Papier und damit zu einer Verformung des Blattes führen können. Die Nasspartie und insbesondere die Siebpartie einer Papiermaschine sind in dieser Beziehung sehr problematisch, da dort lokale Strömungen nicht genau genug sichtbar gemacht werden können.

Dieses Problem und dessen Lösung waren Thema dieser Projektarbeit, die letztendlich zur Entwicklung eines bisher weltweit einzigartigen Verfahrens zur Bestimmung lokaler Strömungen und deren Änderungen auf einem sich im Betrieb befindlichen Papiermaschinensieb geführt hat.

Die bereits zum Patent eingereichte Lösung besteht aus der Messung der Lichtreflexion der Fasersuspension auf dem Papiermaschinensieb unter definierten Beleuchtungsbedingungen. Mittels Industriekameras werden die Veränderungen im Strömungsverhalten der Teilchen erfasst und mittels einer speziell für diesen Zweck entwickelten Software in Echtzeit als

Vektoren am Bildschirm dargestellt. Zusätzlich ist eine automatische Erkennung von Zonen größter Turbulenz, den sog. Hot-Spots, möglich.

Mittels dieser sehr kostengünstigen und mittlerweile praxiserprobten Lösung ist es möglich, unerwünschte Strömungsmuster im Blattbildungsbereich der Papiermaschine rasch und sicher zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten. Das neue Verfahren trägt zur Verringerung von qualitätsbedingtem Produktionsausschuss und somit zur Reduktion des produktionsbedingten Energieverbrauches und der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Die im Projekt gestellten Ziele konnten somit in jeder Hinsicht erreicht werden.

## **1.2. Kurzfassung Englisch**

This project is an important part of a larger project of Mondi Business Paper, targeting on long term quality improvements of office papers and offset printing papers regarding dimensional stability.

It is necessary for every printing procedure, especially when it takes place in several steps and if it includes finishing procedure stages afterwards, that the paper has an exactly defined and if possible unchangeable shape. If such a paper starts to change this shape caused by external or internal forces, this has an impact on the quality of the printing process, the finishing process or in some cases even make those impossible. This is why the so-called dimensional stability of a paper sheet is such an important quality criteria for finishing customers, quality management, production, marketing, etc.

The complete concept of Mondi Business Paper first tried to make changes of the paper dimension precisely measurable because up to date methods of measurement have been too subjective and too little reproducible. This part was already worked out before this project started and was finalised by patenting and by ÖNORM standardisation of the LaBaCuS method, a laser-based curl scanning procedure.

As a second part a procedure was searched for that could put deformations of a paper sheet in direct relation to tensions of the paper web. This working step was implemented with the "Tension-Toy" software. With this we are capable to measure a deformed sheet of paper and to visualise the causal summed up tensions.

The main and final working step was to identify the influence factors causing tension during production, to quantify them, and to put them into a relation with sheet deformations. The wet end and especially the wire section of paper machines are problematic due to the impossibility to clearly visualise local flows there.

This problem and the solution of it have been the topic for this project that finally led to a development that allowed for a worldwide unique process to determine local flow patterns and their changes on a web that is used during a production process. This patented new technology utilises the detection of reflected light from the fibre suspension on the wire section of the paper machine. Changes in the flow pattern of particles are detected by video cameras, calculated and displayed in real time by newly developed software. In addition, areas of high turbulences are automatically marked as hot spots.

The application of this innovative and cost efficient detection method enables papermakers to detect bad flow patterns quickly and set actions to avoid broke and waste, and thereby reduce CO<sub>2</sub> emissions. The goals of this project have been fully achieved.

### **1.3. Danksagung**

Wir bedanken uns bei den KollegInnen der Mondi Business Paper Austria AG für ihre Mithilfe bei der Entwicklung eines neuen und weltweit einzigartigen Systems zur frühzeitigen Bestimmung von Spannungsursachen in der Papierbahn. Hier möchten wir vor allem dem CEO Herrn Ing. Karl Grill, dem Leiter der BU 56 Herrn Erwin Sversepa, den Technologen Herrn Kurt Smekal und Frau Dipl.-Ing. Andrea Hierner sowie der gesamten Belegschaft der Papiermaschine 5 danken, die uns immer wieder die Möglichkeit gegeben haben unsere Ideen direkt in der Produktion auszuprobieren.

Vor allem danken wir aber der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft m.b.H. (FFG) für die Förderung dieses Projektes, ohne die die Entwicklung wahrscheinlich nicht stattgefunden hätte.

Im Namen des Projektteams

**Dipl.-Ing. Wolfgang C. Altenstrasser**

Ulmerfeld – Hausmening, im Sommer 2007



**Abb. 1: Eulenlogo des OWL-Messsystems.**

## 1.4. Kurzbeschreibung des Aufbaus des Endberichtes

Das erste Kapitel enthält die beiden Kurzfassungen dieses Berichtes auf Deutsch und Englisch und eine kurze Danksagung an ausgewählte Personen und Institutionen, ohne die ein Zustandekommen dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Im zweiten Kapitel werden die Ziele des Projektes erläutert.

Im dritten Kapitel wird zunächst auf besonders relevante Eigenschaften von qualitativ gutem Papier eingegangen und insbesondere jene Eigenschaften hervorgehoben, die für eine hohe Dimensionsstabilität maßgeblich sind, wie beispielsweise die Dicke, die Festigkeiten oder die Steifigkeit sowie die konventionelle Messung dieser Eigenschaften und der wesentliche Einfluss des Messklimas. Eine besondere Rolle kommt hier der Dimensionsstabilität und der Blattwölbung, auf Englisch „Curl“ zu, weil die exakte Bestimmung dieser Wölbung als zuvor abgeschlossenes Projekt für diese Arbeit von Bedeutung war. Weiters wird auf Einflüsse auf die Dimensionsstabilität eingegangen.

Im vierten Kapitel werden die Schwerpunkte der Projektarbeit beleuchtet. Zunächst wird, ausgehend vom oben erwähnten abgeschlossenen Projekt, die Verbesserung der Messtechnik in Bezug auf die Papierverformung beschrieben. Anschließend wird auf den Zusammenhang zwischen Curl und Papierspannungen eingegangen. Im Rahmen dieses Projektteils wurde die Tension-Toy Software entwickelt, mit der der Einfluss der Papierspannungen auf den resultierenden Curl modelliert und dargestellt werden kann. Anschließend werden die möglichen Ansätze zur Früherkennung von Curl beschrieben. Zu einigen dieser Ansätze wurden auch schnelle Tests an der Papiermaschine durchgeführt. Zuletzt wird auf den umgesetzten Lösungsansatz und das dabei entstandene Messgerät – die „Eule“ – eingegangen. Im fünften Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen mit der Eule kurz geschildert und die wirtschaftliche Bedeutung des Projektes an Hand von Daten aus der Praxis dargestellt. Anschließend wird ein kurzer Ausblick auf zukünftige Tätigkeiten gegeben.

Im letzten Kapitel folgt der Bezug, den dieses Projekt zur Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ hat.

## 2. Ziele des Projektes

Die Produktion von Papier ist ein hochkomplexer Prozess, da einerseits die Qualität des natürlichen Rohmaterials „Zellstoff“ variiert, andererseits eine sehr große Zahl von Parametern (rund 6000) zu kontrollieren ist. Qualitätskontrollen am Ende der Papierproduktion stellen sicher, dass trotzdem alle gewünschten Produkteigenschaften erzielt werden.

Ziel dieses Projektes war es, ein grundlegend neues Messverfahren zu entwickeln, das während der Qualitätskontrollen die wichtige Eigenschaft der Verformung so genau messen kann, dass frühzeitig Rückschlüsse auf Tendenzen der dafür ursächlichen inneren Spannungen gezogen werden können. Dadurch wird Zeit gewonnen, um geeignete Korrekturen der Prozessparameter vorzunehmen und wirksam werden zu lassen. Somit wird dem eventuel-

len Aufbau innerer Spannungen entgegengewirkt, und als Resultat die „Papierverformung“ innerhalb der Toleranzgrenzen gehalten. Folglich wird ein diesbezüglicher Produktionsausschuss vermieden, was eine beträchtliche Einsparung insbesondere an Energie darstellt.

Um die Wirksamkeit dieser Qualitätssicherungsstrategie zu garantieren, hatte dieses Projekt ebenfalls den Aufbau eines Expertensystems zum Ziel, das aus der gemessenen Papierverformung und den ermittelten Tendenzen der inneren Spannungen effektive ausgleichende Maßnahmen bzw. Änderungen der Prozess-Parameter vorschlagen kann.

Um diese Ziele zu erreichen, strebte dieses Projekt folgende Teilziele an:

1. Grundlagenforschung und Entwicklung eines derart feinauflösenden Messverfahrens, dass eventuelle Tendenz in der Papierbahn-Verformung schon frühzeitig erkannt werden können.
2. Ermittlung des Ursache-Wirkungs-Verhältnisses zwischen der äußerlich messbaren Papierbahnverformung und den ursächlichen inneren mechanischen Spannungen.
3. Korrelation von Änderungen der inneren Spannungen in der Papierbahn und Änderungen relevanter Produktionsparameter.
4. Ermittlung von korrigierenden Regelstrategien der Produktionsparameter, um eventuellen Tendenzen der Papierbahnverformungen frühzeitig entgegenzuwirken und somit die Verformung in akzeptablen Toleranzgrenzen zu halten.

Ein derartiges Verfahren kann schätzungsweise mindestens 10% am gesamten qualitätsbedingten Ausschuss vermeiden. Allein für die österreichische Produktion der Mondi Business Paper (früher „Neusiedler AG“), die Mondi Business Paper Austria AG, bedeutet dies eine jährliche Energie-Einsparung von ca. 350 MWh an Strom sowie 3500 GJ an Dampf, bzw. der Vermeidung eines CO<sub>2</sub> Ausstoßes von 210 t. Aus wirtschaftlicher Sicht kann ein jährlicher Verlust von ca. EUR 330.000 vermieden werden.

## 3. Allgemeine Einführung in die Thematik

### 3.1. Mechanische Papiereigenschaften

Zu den sogenannten mechanischen Papiereigenschaften zählt man vor allem jene, die auf physikalisch-mechanischem Weg bestimmt werden können, wie beispielsweise die Grammaturnatur – durch einfaches Abwägen einer Probe und Hochrechnen der Masse auf einen Quadratmeter – wie auch die Dicke, die Dichte beziehungsweise das Volumen, die Oberflächen glätte, die Porosität, der Widerstand gegen Abrasion, die Form und Ausformung des Papierblattes und diverse Festigkeitseigenschaften. Zu den mechanischen Eigenschaften gehören nicht solche, die durch optische Messungen erfasst werden können, wie zum Beispiel die Opazität, die Weiße oder der Farbort, oder jene, die durch Zuhilfenahme von Chemikalien bestimmt werden müssen, wie zum Beispiel der DCM-Extrakt und so weiter. Im Folgenden soll auf einige relevante mechanische Eigenschaften des Papiers näher eingegangen werden.

#### 3.1.1. Flächenbezogene Masse, Flächengewicht, Grammaturnatur

Unter der flächenbezogenen Masse versteht der Papiermacher die Masse eines ein Quadratmeter großen Bogens. Sie wird laut ISO 536 in Gramm pro Quadratmeter [ $\text{g}/\text{m}^2$ ] angegeben. Sinnvoll wäre es, zu diesem Wert auch den Wassergehalt beziehungsweise die absolute oder relative Feuchte des Bogens anzugeben. In der Regel wird aber dieser Wert auf ein Standardklima (siehe Kapitel 3.2.1 „Klima und Papier“) bezogen.

Die definitionsgemäße Trennung zwischen Papier und Karton, beziehungsweise im deutschsprachigen Raum die Trennung zwischen Papier, Karton und Pappe erfolgt an Hand der flächenbezogenen Masse:

- Papier:  $\leq 150 \text{ g}/\text{m}^2$
- Karton :  $150 \text{ g}/\text{m}^2 - 400 \text{ g}/\text{m}^2$
- Pappe:  $> 400 \text{ g}/\text{m}^2$

#### 3.1.2. Dicke und Volumen

Die Dicke  $d$  eines Papierblattes [ $\mu\text{m}$ ] hat nicht nur auf subjektive haptische Eindrücke Einfluss sondern auch auf mechanische Eigenschaften wie zum Beispiel die Steifigkeit (siehe Kapitel 3.2.5 „Die Messung der Steifigkeiten“), weil sie mit der dritten Potenz in die Steifigkeit eingeht. In der Produktion wird Dicke in allen Kompaktierungs- und Glättungsschritten eingebüßt, z.B. bei einer intensiven Entwässerung am Sieb oder in der Presse und beim Einsatz von Glättwerken oder Kalandrageragregaten.

Das Volumen als Kehrwert der Dichte gibt unter anderem an, wie viel freier Raum im Blattgefüge zur Verfügung steht, wenn man das Blatt als mechanisches System von Verstrebungen ansieht. Hier zeigt sich eine gute erste Beurteilungsmöglichkeit für die Steifigkeitsprüfung.

### **3.1.3. Festigkeitseigenschaften**

Die Festigkeit von Papier, also der physikalische Widerstand gegen das Zerreißen, spielt eine wichtige Rolle in der Fertigung, aber auch in den folgenden Weiterverarbeitungsschritten. Für grafische Papiere ist beispielsweise die Festigkeit in den Druckmaschinen bei der Verarbeitung aus der Rolle ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Für Sackpapiere ist die Festigkeit des Produktes entscheidend darüber, ob ein beispielsweise mit Zement gefüllter Sack durch diese Belastung aufreißt oder nicht. Prinzipiell wird zwischen statischen Festigkeiten, das sind jene, die einen initialen Riss überhaupt erst ermöglichen, und dynamischen Festigkeiten unterschieden, wobei letztere für das sich Vergrößern eines bereits bestehenden Risses verantwortlich sind.

Die Einflussfaktoren für statische Festigkeiten liegen hauptsächlich in der Anzahl der Faser-Faser-Bindungen, die durch ein gezieltes Aufmahlen der Rohstofffasern positiv beeinflusst werden können. Dynamische Festigkeiten werden in der Regel durch die Verteilung der mittleren Faserlängen beeinflusst, wobei ein möglichst hoher Anteil von Langfasern aus Nadelholz oder Baumwolle nützlich ist. Die Mahlung der Fasern kann durch falsche Wahl der Refinergarnituren zu Faserkürzungen führen, die wiederum die dynamischen Festigkeiten herabsetzen. Aus diesem Grund erhöhen die meisten Mahlungsvorgänge zunächst die allgemeinen Festigkeitseigenschaften, um dann bei entsprechender Übermahlung zu einem erneuten Absenken dieser Eigenschaften zu führen.

Ein wesentlicher Festigkeitsparameter ist der Elastizitätsmodul, weil er mechanischen Einfluss auf eine weitere wesentliche Papiereigenschaft hat, die Steifigkeit.

### **3.1.4. Steifigkeiten**

Unter der Steifigkeit von Papier, Karton und Pappe versteht man den Widerstand des Materials gegen eine Verformung im elastischen Bereich [1]. Sie wird als wesentliche Qualitätseigenschaft von Bürokommunikationspapieren und Druckpapieren im Allgemeinen gesehen, weil sie zu den Einflüssen gehört, die eine gute Verdruckbarkeit in bildgebenden Verfahren gewährleisten. Die Steifigkeit ist also die Gegenkraft, die den superponierten inneren Spannungen im Blatt entgegenwirkt. Während die inneren Spannungen mit zunehmender Verformung allerdings abnehmen, nimmt der Widerstand durch die Steifigkeit langsam zu. Wird ein Zustand des Kräftegleichgewichts erreicht, in dem die verformenden inneren Spannungen gleich groß sind wie die Steifigkeit, dann hat das Blatt seine endgültige Gleichgewichtsform erreicht.

### **3.1.5. Papierwölbung, Curl, Diagonalität**

Die Gleichgewichtsform des Papierblattes kann nun durch Papiermacher beschrieben werden. Je nach Art und Ausmaß dieser Verformung können nun unterschiedliche Ursachen empirisch identifiziert werden und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, die diesen Qualitätsmangel beheben.

Eine der einfachsten Verformungen ist dabei das Einrollen des Blattes über eine einzelne Achse, wobei die Lage dieser Achse zum Blatt die Art des Einrollens identifiziert. Liegt die Rollachse parallel zur Hauptachse des Blattes (also parallel zur längeren Seite eines A4 Blattes), dann sprechen wir vom „MD-Curl“ oder auch dem „Schüsseln“. Bei einer genau normal dazu stehende Rollachse bezeichnen wir die Verformung als „CD-Curl“ oder „Rollen“. Beide Wölbungsarten sind zwar unangenehm für die Produktion, aber weitestgehend behebbar oder reduzierbar durch Ändern von Produktionsparametern an der Papiermaschine. Die für den Papiermacher unangenehmste Form des Wölbens ist diejenige, bei der die Rollachse in einem geneigten Winkel zur Hauptachse steht, also diagonal zu dieser. Wir sprechen dann vom „Diagonal-Curl“ oder der „Diagonalität“. Diese Verformung resultiert meistens aus den beiden vorher angesprochenen und ist in ihrer Behebung oder Linderung wesentlich schwieriger.

Neben den parametrischen Ursachen kann es für eine solche Dimensionsinstabilität aber auch maschinenbauliche Ursachen haben, wie falsch dimensionierte oder ausgelegte Stoffaufläufe. Solche baulichen Fehler einem Lieferanten nachzuweisen war bisher sehr schwierig.

## **3.2. Konventionelle Papierprüfung und ihre Grenzen**

An dieser Stelle soll nur ganz kurz auf die wesentlichsten Vor- und Nachteile einer Online und Offline Prüfung eingegangen werden und schließlich erklärt werden, warum die Offline Prüfung in unserem Fall zu diesem Projekt geführt hat.

Online Prüfungen liefern zwar schnelle Daten, sind aber in der Regel lokal begrenzt durch den Einbauort des Sensors. Um die ganze Papiermaschinenbreite erfassen zu können werden daher aus Kostengründen meist traversierende Sensoren eingebaut, die auf Grund ihrer Verschiebungsgeschwindigkeit allerdings viele Fehler in der Bahn schlichtweg übersehen.

Offline Messungen können zwar die gesamte Bahnbreite überschauen und Messwerte liefern, aber nur von einem kleinen Längsabschnitt der Bahn. Außerdem muss bis ans Ende eines Produktionstambours gewartet werden, bis die Proben genommen werden können. Aus Zeit- und Personalgründen wird bei Mondi Business Paper Austria nur jeder dritte Maschinentambour gemessen und die dazwischen liegenden in ihren Qualitätswerten als interpoliert angenommen.

Beide Prüfungsverfahren haben Nachteile, die für unsere Zwecke nicht akzeptabel waren. Daher mussten wir ein System entwickeln, das erstens schnelle Messwerte liefern kann und zweitens weitestgehend die gesamte Maschinenbreite beobachten kann.

Ein solches System hätte den Vorteil, ohne dazwischen liegende Warte- oder Auswertezeiten sofort Werte an den Maschinenführer und die Produktion zu liefern und dabei auch noch die gesamte zu beachtende Oberfläche zu erfassen.

### 3.2.1. Klima und Papier

Jedes Papier enthält eine bestimmte Menge Wasser oder Feuchtigkeit, die neben den Papiereigenschaften auch vom Wassergehalt der umgebenden Luft abhängig ist. Die in der Luft enthaltene Wassermenge wiederum hängt ab von der Temperatur und der sogenannten relativen Luftfeuchtigkeit  $\varphi$ . Diese ist der Quotient aus dem Partialdruck des Wasserdampfes  $p_D$  und dem Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes  $p_s$  bei der jeweiligen Lufttemperatur [2]:

$$\varphi = \frac{p_D}{p_s} \cdot 100\%$$

Die Zusammenhänge zwischen Temperatur und Luftfeuchtigkeiten kann man aus dem Mollier-Diagramm (Abb. 2) sehr gut ersehen. Nachdem es sich bei Zellstofffasern um ein stark hygroskopisches Material handelt, welches sich bei Wasseraufnahme und -abgabe auch in seinen Dimensionen ändert, d.h. die Fasern schrumpfen oder dehnen sich unterschiedlich aus, spielt der Wassergehalt in diesen Fasern und letzten Endes der Wassergehalt im fertigen Papier eine maßgebliche Rolle bei der Bestimmung von Papiereigenschaften.

Tab. 1 enthält den Gleichgewichtswasseranteil verschiedener Papiere bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten bei 23°C:

Papierart	Grammatur in g/m <sup>2</sup>	Relative Feuchte in %		
		20	50	75
Zeitungsdruckpapier	50	6,5	8,5	10,0
Tiefdruckpapier	65	6,0	8,0	9,2
Offset, h´haltig	80	5,2	6,4	7,9
Offset, h´frei	80	5,0	6,3	7,5
Kunstdruckpapier, h´haltig	120	4,1	5,7	6,9
Kunstdruckpapier, h´frei	120	3,8	5,3	6,5

**Tab. 1: Absolute Gleichgewichtsfeuchte verschiedener Papiere bei 23°C [3].**

Mollier-h,x-Diagramm für feuchte Luft für p = 1 bar

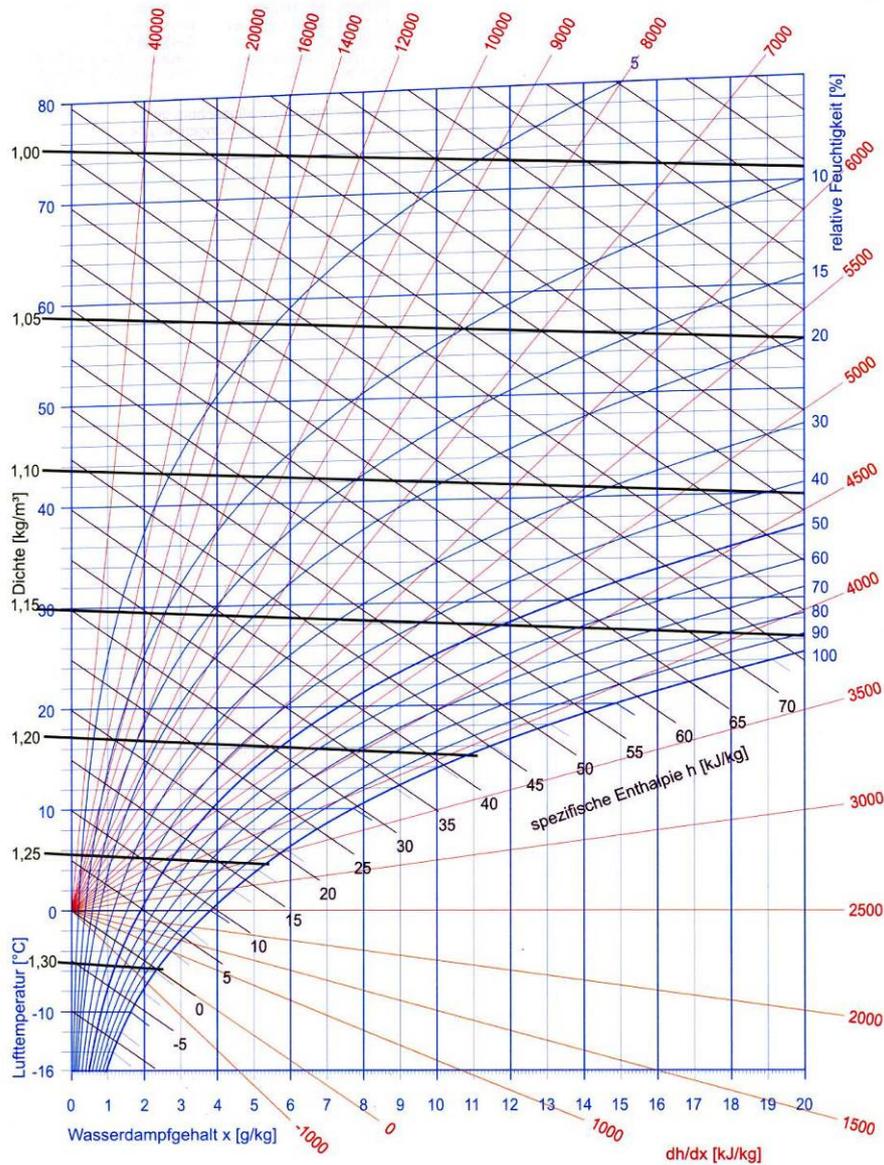


Abb. 2: Mollier-Diagramm für feuchte Luft [4].

Aus diesem Grund spielt es einerseits eine wesentliche Rolle, bei welchem Temperatur- und Feuchtigkeitsklima die Papierproben gemessen werden, und andererseits hat auch die Entwässerungs- und Trocknungsvorbehandlung des Papiers während der Produktion einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des Fertigproduktes.

Das Normprüfklima für Papier, Karton und Pappe beträgt nach DIN ISO 187 23°C sowie 50% relative Luftfeuchte [1].

### 3.2.2. Die Messung von Dicke und Volumen

Das spezifische Volumen  $V_{\text{spez}}$ , auch als „Bulk“ bezeichnet und in Kubikzentimeter pro Gramm [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ] angegeben, berechnet sich aus der Grammatur  $m$  [ $\text{g}/\text{m}^2$ ] und der Dicke  $d$  [ $\mu\text{m}$ ] des Papierblattes zu [7]:

$$V_{\text{spez}} = \frac{d}{m}$$

### 3.2.3. Die Messung der statischen Festigkeitseigenschaften

Die statischen Festigkeitseigenschaften sind hauptsächlich von der Anzahl und der Stärke der Faser–Faser–Bindungen abhängig. Die Fasern selbst halten einer wesentlich höheren Belastung stand als die Bindungen. Trotzdem spielt die Orientierung der Fasern, ob normal oder parallel zum Riss, eine entscheidende Rolle über den Betrag der statischen Festigkeitswerte.

Die Bruchlast oder Zugfestigkeit in Newton [N] wird nach DIN 53112 mit einem Dynamometer bestimmt, wobei der Bruch der Probe nach  $20 \pm 5$  Sekunden erfolgen muss. Der Prüfstreifen hat in der Regel eine Breite von 15 mm und der Abstand der Klemmen wird auf 180 mm gestellt. Um den Einfluss der Grammatur nicht ins Ergebnis mit einzubeziehen wird der Zugfestigkeitsindex als Quotient aus der Zugfestigkeit und der Grammatur gebildet [1].

Die Reißlänge  $L$  [km] ist die hypothetische Länge eines Probenstreifens von konstanter Breite, der einseitig aufgehängt unter seinem Eigengewicht am Aufhängepunkt reißt<sup>1</sup>. Sie kann nach Hoyer folgendermaßen berechnet werden: [7]

$$L = \frac{F_B}{m \cdot b \cdot g}$$

wobei  $F_B$  = gemessene Bruchkraft der Papierprobe,  
 $m$  = Grammatur der Papierprobe,  
 $b$  = Probenbreite des gemessenen Papierstreifens und  
 $g$  = Normfallbeschleunigung ( $9,80665 \text{ m/s}^2$ ).

Durch das Berücksichtigen der Probenstreifenbreite und der flächenbezogenen Masse ist die Reißlänge eine spezifische Größe, die als direkter Vergleich zwischen den Proben herangezogen werden kann. Für klassische Papiere liegt die Reißlänge in der Regel im Bereich von 1 bis 8 km [3]. Nachdem sich die bevorzugte Orientierungsrichtung der Papierfasern auf die Zugfestigkeit auswirkt, wird die Reißlänge in Maschinenlaufrichtung ( $L_l$ ) und in Querrichtung ( $L_q$ ) berechnet und manchmal sogar nur der arithmetische Mittelwert  $L_m$  der beiden angegeben:

$$L_m = \frac{L_l + L_q}{2}$$

Gleichzeitig mit der Bruchlast wird die Bruchdehnung [%] gemessen. Sie ist in der Regel in Querrichtung etwa zwei- bis dreimal so groß wie in Maschinenlaufrichtung. Aus dem Verhält-

---

<sup>1</sup> Der Begriff der „Reißlänge“ wurde erstmals von Galileo Galilei geprägt.

nis von Spannung  $\sigma$  (Kraft pro Querschnittsfläche) und Dehnung  $\varepsilon$  kann der Elastizitätsmodul  $E$  berechnet werden. Er spielt eine wichtige Rolle für die Steifigkeit.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Der Elastizitätsmodul liegt für Papier in der Regel im Bereich von 1,8 bis 4,3 GPa [3].

### 3.2.4. Die Messung der dynamischen Festigkeitseigenschaften

Der wichtigste Einflussfaktor für dynamische Festigkeiten ist die Faserlängenverteilung. Werden Fasern zu hoch oder zu stark kürzend aufgemahlen, so nehmen die dynamischen Festigkeiten des Papierblattes in der Regel ab. Auch die richtige Auswahl der Faserrohstoffe ist von entscheidender Bedeutung.

Die wichtigste dynamische Festigkeitseigenschaft ist der Durchreißwiderstand nach Elmen-dorf laut DIN 53128. Es ist dies die mittlere Kraft, die erforderlich ist, um einen Schnitt in einer Probe weiter einreißen zu lassen. Diese Kraft ist ebenfalls richtungsabhängig. Der Durchreißindex  $D$  ist der Durchreißwiderstand  $W$  bezogen auf eine Grammaturn von 100 g/m<sup>2</sup>:

$$D = \frac{W}{m} \cdot 100$$

mit  $m$  = flächenbezogene Masse der Probe. Die Probe ist 50 mm breit und der Schnitt ist 7 mm tief [1].

### 3.2.5. Die Messung der Steifigkeiten

Unter der Steifigkeit versteht man im Allgemeinen den Widerstand der Probe gegen eine Durchbiegung im elastischen Verformungsgebiet. Genau wie andere Festigkeitseigenschaften ist auch die Steifigkeit richtungsabhängig. Die spezifische Steifigkeit  $S$  wird im Qualitätsprüflabor gemessen, könnte aber ebensog berechnet werden nach der Formel:

$$S = \frac{E \cdot I}{b}$$

mit  $E$  = Elastizitätsmodul (siehe Kapitel 3.2.33.2.3 „Die Messung der statischen Festigkeitseigenschaften“) und  $I$  = Flächenträgheitsmoment 1. Ordnung

$$I = \frac{b \cdot d^3}{12}$$

womit

$$S = \frac{E \cdot d^3}{12}$$

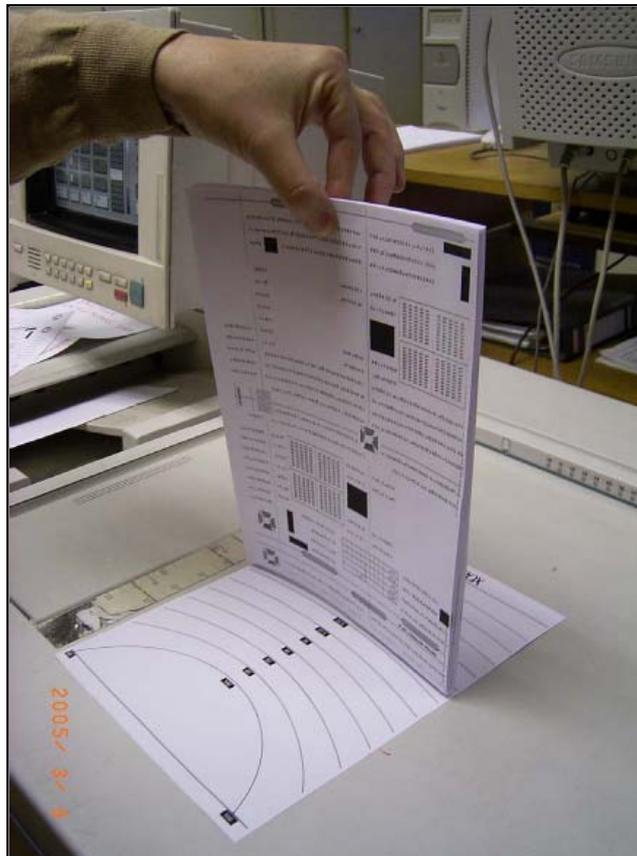
Damit wird klar, dass die Steifigkeit direkt proportional zum Elastizitätsmodul und direkt proportional zur dritten Potenz der Probendicke  $d$  ist [1].

### 3.2.6. Die Bestimmung von Wölbung, Curl und Diagonalität

Die bisherige Messung der Papierblattwölbung erfolgte nach einer manuellen Vergleichsmethodik, bei dem ein Einzelblatt oder Blattstoß (Abb. 3) mit einer Anzahl von Krümmungskurven auf einer Schablone verglichen und die ähnlichste Kurve als Messwert angegeben wurde.

Diese Kurvenvergleiche müssen mehrmals pro Probe stattfinden:

- beim unbedruckten Blatt Papier, als die sogenannte Vorspannung
- beim einseitig bedruckten Papier mit bedruckter Siebseite
- beim einseitig bedruckten Papier mit bedruckter Filzseite
- beim zweiseitig bedruckten Papier, wobei die Siebseite zuerst bedruckt wurde
- beim zweiseitig bedruckten Papier, wobei die Filzseite zuerst bedruckt wurde



**Abb. 3: Bisherige (manuelle) Messung der Papierkrümmung.**

Bei dieser Messung hängt das Ergebnis stark von der subjektiven Beurteilung durch den Prüfer ab, wodurch es zu Schwankungen im Messergebnis kommen kann. Ein weiterer Nachteil dieser Prüfung ist, dass nur diskrete Messwerte angegeben werden können. Laut Prüfvorschrift darf zwischen den Kurven der Schablone nicht interpoliert werden.

Die Messung der Diagonalkrümmung erfolgt ohne Schablonen und nur auf Grund von Vergleichsbildern.

Mittlerweile ist man bei Mondi Business Paper auf ein wesentlich zuverlässigeres und objektiveres laserelektronisches Messverfahren umgestiegen, das bei uns im Haus entwickelt worden ist, den LaBaCuS (siehe Kapitel 4.1.1 „Der LaBaCuS als Ausgangspunkt“).

### **3.3. Einflussfaktoren auf die relevanten Papiereigenschaften**

#### **3.3.1. Einflüsse des Fasermaterials**

Die Wahl des richtigen oder geeignetsten Rohmaterials für die Produktion von Papier, Karton oder Pappe hat, wie bisherige Erfahrungen zeigen, entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des fertigen Papiers. Dabei spielt nicht nur der Ursprung der Fasern eine Rolle, also ob es sich um sogenannte „Primärfasern“ oder „Sekundärfasern“ (also rezyklierte Fasern) handelt, sondern auch die Ursprungspflanze. Einjahrespflanzen, wie Stroh oder Baumwolle liefern anderes Rohmaterial als Bäume. Laubbäume mit ihren kurzen eher dicken Fasern beeinflussen andere Faktoren als Nadelholzfäsern. Erstere verbessern die Formation, geben eine gleichmäßige und gut bedruckbare Oberfläche und erhöhen das Volumen und zweitens erhöhen die Festigkeit des Papierblattes. Hier kann jedoch auch zwischen einzelnen Spezies unterschieden werden. Beispielsweise gibt es über zwanzig verschiedene Eukalyptussorten, die alle auch unterschiedliche Fasereigenschaften aufweisen. Weiters ist es wesentlich, ob das Ausgangsmaterial chemisch zum Zellstoff aufgeschlossen wurde oder mechanisch zum Holzstoff oder Holzschliff. Es stellt sich die Frage nach der chemischen Vorbehandlung sowie Art und Intensität der Faserstoffbleiche.

Bei Mondi Business Paper haben wir uns mit diesem Thema insbesondere unter Berücksichtigung der Dimensionsstabilität in zwei internationalen Projekten auseinandergesetzt. Dabei wurde lediglich auf den Faserrohstoff und das Gemisch aus diesen Rohstoffen eingegangen und andere Faktoren unberücksichtigt gelassen. Die Ergebnisse aus diesen Projekten zeigten einen signifikanten Einfluss auf diese Eigenschaften und wiesen klar auf die Wichtigkeit einer richtigen und gezielten Auswahl hin.

#### **3.3.2. Einflüsse der Faserstoffaufbereitung**

In der Faserstoffaufbereitung spielen einzelne Prozessschritte eine wesentliche Rolle, wie z.B. die Mahlung der Fasern bzw. des Faserngemisches inklusive einer möglichen Zwischenquellung. Unter der Mahlung versteht man eine mechanische Behandlung der Faserstoffsuspension, bei der es durch Faser-Faser-Reibung bzw. der Reibung von Fasern an rotierenden Metalloberflächen, den sogenannten Mahlungsgarnituren, zur Erhöhung der spezifischen Oberfläche und zur Kürzung von Fasern kommt. Bei dieser Kürzung entstehen auch Faserbruchstücke, die als Feinstoffe bezeichnet werden und die in ihrer Anzahl und Verteilung im späteren Papierblatt ebenso einen Einfluss auf die Fasereigenschaften haben. Die Dosiermenge und der Dosierort von Prozesschemikalien und Produktchemikalien haben

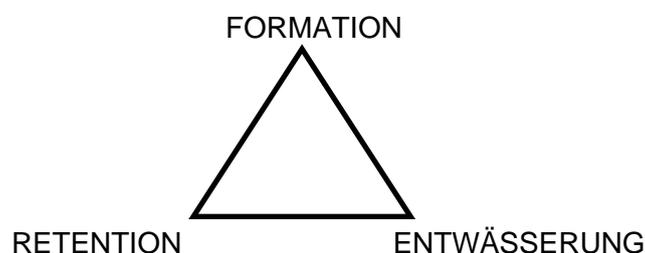
ebenso Einfluss auf spätere Eigenschaften wie die Konzentration der Fasern in der Suspension, die Art und Intensität einer Sortierung oder Fraktionierung und die Temperatur des Gemisches.

Im Wesentlichen zeigt sich, dass es eine fast schon unüberschaubare Anzahl von Faktoren gibt, die berücksichtigt werden und miteinander in einen physikalisch-chemischen Bezug gebracht werden müssten, um präzise Vorhersagen über die Produkteigenschaften machen zu können. Verschiedenste mathematische Modellansätze der letzten Jahre führten zu der Einsicht, dass es mit bisherigen Mitteln nicht möglich war, Vorhersagemodelle zu programmieren oder auf andere Art und Weise zu ermitteln. Dies war für uns ebenfalls ein Entscheidungsgrund, um uns nicht auf die Ursachen sondern auf die überschaubare Anzahl der Symptome zu konzentrieren.

### 3.3.3. Einflüsse der Blattbildung

In der Blattbildungszone versucht der Papiermacher ein möglichst homogenes Blattgefüge zu erzeugen und diese Qualität über die Zeit konstant zu halten. Dabei müssen die Formation der Papierbahn, die Grammat, die Retention der Fasern, die Zweiseitigkeit des Blattes in Hinsicht auf Füllstoff- und Feinstoffverteilung einer wirtschaftlichen Produktionsweise gegenübergestellt werden. Üblicherweise findet sich ein Kompromiss, bei dem das Produkt mit seinen Eigenschaften in einem für den Kunden passenden Toleranzbereich gefertigt werden kann.

Vor allem drei Faktoren stehen in einem Widerspruchs-dreieck zu einander in Beziehung:



**Abb. 4: Parameterdreieck der Blattbildung.**

Werden jeweils zwei dieser Faktoren positiv beeinflusst, so geht dies zu Lasten der dritten Eigenschaft. Alle drei sind Eigenschaften, die die Qualität des Produktes beeinflussen. Die Formation unterstützt die Gleichmäßigkeit der Bedruckbarkeit. Die Retention hat Einfluss auf die Opazität, die Farbaufnahme, die Dimensionsstabilität und auch die Bedruckbarkeit. Die Entwässerung beeinflusst die Zweiseitigkeit des Blattes. Retention und Entwässerung sind außerdem auch wirtschaftliche Faktoren, die den effizienten Rohstoffeinsatz einerseits und die Produktionsgeschwindigkeit und damit die spezifischen Fixkosten andererseits berühren. Im Idealfall würde die Faserstoffsuspension im unterkritischen Konzentrationsbereich im exakt definierten Auslaufverhältnis auf das sich umdrehende Sieb treffen und bei homogen gerichteter turbulenter Strömung, ohne zu früh auszuflocken, in einer definierten Faserorien-

tierungsrichtung entwässert und damit im Gefüge fixiert werden. Davon beeinflusst ergäbe sich das geforderte Längs-Quer-Verhältnis für die Bahn in einer qualitativen Gleichmäßigkeit. Die Realität steht in einem wirtschaftlichen und technologischen Widerspruch zu dieser Idealfertigungsform. Die aus finanziellen Gründen überkritische Konzentration braucht ausreichende Makroturbulenzen durch den konstruktiv angepassten Stoffauflauf, um nicht zu großen Flocken und damit zu einer ungleichmäßigen Formation zu führen. Unregelmäßigkeiten in der Geometrie des Stoffauflaufes, des Querstromverteilers, der Turbulenzgeneratoren, Stufendiffusoren, Verdünnungswasseraufgabestellen, Siebspannungen und auch des Siebes sowie der Entwässerungsaggregate führen zu unkontrollierbaren und bisher unmessbaren Strömungsbildern in der Blattbildungszone. Den lokalen Strömungen folgend fügen sich die Fasern nun in schwer sichtbaren Vorzugsrichtungen im Blattgefüge zusammen. Die scheinbar stochastische Verteilung dieser Vorzugsrichtungen wird oft als durchaus erwünscht angesehen, trägt sie doch zu einem isotropen Werkstoffgefüge im Produkt bei. Tatsächlich ist die Struktur aber keineswegs zufällig, sondern das Resultat aus Strömungen, die wiederum auf Unregelmäßigkeiten in der Blattbildung zurückzuführen sind. Die Unkenntnis dieser Strömungsverhältnisse wird nun durch den Zufall entschuldigt.

Schließlich hat die Entwässerung und der durch Elemente wie Entwässerungsleisten verursachte „Backwash – Effekt“ den entscheidenden Anteil an der zweiseitigen oder gleichmäßigen Verteilung von Faserfeinstoffen oder Füllstoffen, mit den damit verbundenen Blattdichteunterschieden und der in z-Richtung unterschiedlichen Dichte an Wasserstoffbrücken bzw. (potentiellen) Verspannungslinien.

#### **3.3.4. Einflüsse der Trocknung**

Die Trocknung hat ebenfalls einen maßgeblichen Anteil an dem Aufbau bzw. der Konservierung von Verspannungen. Ursache dafür ist die Eigenschaft der Pflanzenfaser bei Austrocknung zu schrumpfen. Diese Schrumpfung ist aber ebenfalls keine isotrope Eigenschaft, sondern in Faserquerrichtung um bis zu 40% höher als in Faserlängsrichtung. Hier lässt sich nun sehr deutlich die Wichtigkeit der kontrollierten Faserorientierung sehen. Ebenso von Bedeutung ist auch die spezifische Position der Faser in der Bahn an sich. Während Fasern in den mittleren Bahnbereichen durch andere Fasern an einem freien Schrumpfen gehindert werden – es würde sonst das Blatt durch die Trocknung einfach in Stücke zerreißen – haben Fasern an den Rändern nur eine einseitige Behinderung und können somit quasi – frei schrumpfen. Das zeigt sich auch durch die erhöhte geometrische Schrumpfung von bis zu 20% in den Randbereichen.

Die Eigenheit der Trocknung, zusätzliche Verspannungen ins Blatt einzubringen, kann aber zu einem beachtenswerten Teil bereits kontrolliert und genutzt werden, um gegenzuheizen. Dabei wird ein bewusst gewollter Temperaturunterschied zwischen der oberen und der unteren Trockenzylinderreihe genutzt, um dem Papierblatt eine Verwölbung mitzugeben bzw. einer bekannten Verwölbung entgegenzuwirken.

### **3.3.5. Ausschuss und interne Wiederaufbereitung**

Ausschuss ist bereits einmal durch die Trockenpartie gelaufen und hat damit einen höheren Verhornungsgrad als das übrige Fasermaterial. Wird dieser Ausschuss durch die interne Wiederaufbereitung nicht ausreichend zerfasert und gut genug in die Suspension gemischt, dann entstehen lokale Felder in der Papierbahn mit mehr oder weniger stark abweichenden Eigenschaften als die Umgebung.

## **4. Inhalte des Projektes**

Der Ausgangspunkt für dieses Projekt war die Beurteilung der Qualität und die Rückkopplung in die Produktion. Von der fertigen Rolle werden Proben genommen und eine Reihe von Qualitätsparametern untersucht. Unter anderem werden Kopiertests durchgeführt und die Krümmung des Papiers vor und nach dem Kopieren gemessen. Die Anzahl der zu überprüfenden Qualitätsparameter erlaubt eine vollständige Untersuchung jedoch nur bei jeder dritten Rolle. Dazwischen kann sich der Papiermacher nur auf die wenigen Online-Qualitätsmessungen verlassen. So kann es verhältnismäßig lange dauern, bis ein Problem tatsächlich entdeckt wird. Setzt der Papiermacher nun Maßnahmen, um den Fehler zu beheben, so benötigt es wiederum eine entsprechende Zeit, bis er eine Rückmeldung über den Erfolg seiner Bemühungen erhält. Die Verkürzung dieser Rückkopplungsschleife erlaubt daher, empfindliche Mengen an qualitätsbedingtem Ausschuss zu vermeiden.

Die Optimierung der Rückkopplungsschleife bezüglich der Papierkrümmung wurde in drei Teilstufen durchgeführt:

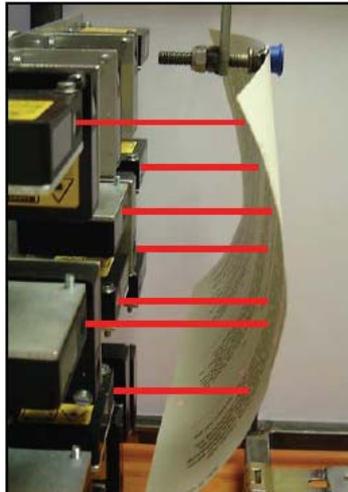
1. Steigerung der Genauigkeit der Messung des Curls, beschrieben in Kapitel 4.1 „Die Messung der Papierverformung“.
2. Überlegungen zum theoretischen Zusammenhang zwischen Curl und Papierspannungen. Hierzu wurde die Tension-Toy Software entwickelt, die in Kapitel 4.2 „Zusammenhang zwischen Curl und Papierspannungen“ beschrieben wird.
3. Untersuchung verschiedener Lösungsansätze zur Früherkennung von Curl und kurze Praxisversuche (Kapitel 4.3 „Lösungsansätze zur Früherkennung von Papierverformungen“). Die meistversprechende Methode wurde dann in ein praxistaugliches Messgerät umgesetzt (Kapitel 4.4 „Die Eule (OWL – Optical Wire Section Lookout“).

## **4.1. Die Messung der Papierverformung**

### **4.1.1. Der LaBaCuS als Ausgangspunkt**

Der „Laser Based Curl Scanner“, kurz LaBaCuS, war eine diesem Projekt vorausgehende Auftragsarbeit für das Center of Competence for Quality Measurement (CC QM). Die Aus-

gangslage war eine manuelle Messung von Papierkrümmungen (siehe auch Kapitel 3.2.6 "Die Bestimmung von Wölbung, Curl und Diagonalität", sowie Abb. 3: Bisherige (manuelle) Messung der Papierkrümmung). Die Krümmung, auch als Curl bezeichnet, ist eine wesentliche Qualitätseigenschaft und kann durch Nichterreichen der Kundenspezifikationen dazu führen, dass produzierte Papierrollen als interner Ausschuss wiederaufbereitet werden müssen. Durch die Internationalität des Konzerns ergibt sich als ein signifikantes Problem die Abweichung der Messgüte bei einem subjektiven Messverfahren, bei dem es letzten Endes nur um die visuelle und empirische Aussage von Qualitätsprüfern ankommt, die aus verschiedensten Gründen untereinander abweichen können. Auch die Reproduzierbarkeit und die Genauigkeit dieser Aussagen können mitunter Anlass zu internen Diskussionen geben. Der Wunsch nach einem standardisierten und objektiven Messverfahren war verständlich und wurde in dem Projekt LaBaCuS umgesetzt. Dabei wird eine Probenoberfläche durch Laserabstandsmesssensoren erfasst und ein dreidimensionaler Zylinder in die abgetastete Papieroberfläche eingepasst. Die Lage der Zylinderachse im Raum und der Durchmesser des Zylinders werden mathematisch errechnet und dienen als Basis für die ausgegebenen Messwerte, die automatisch in das Qualitätsleitsystem übertragen werden.



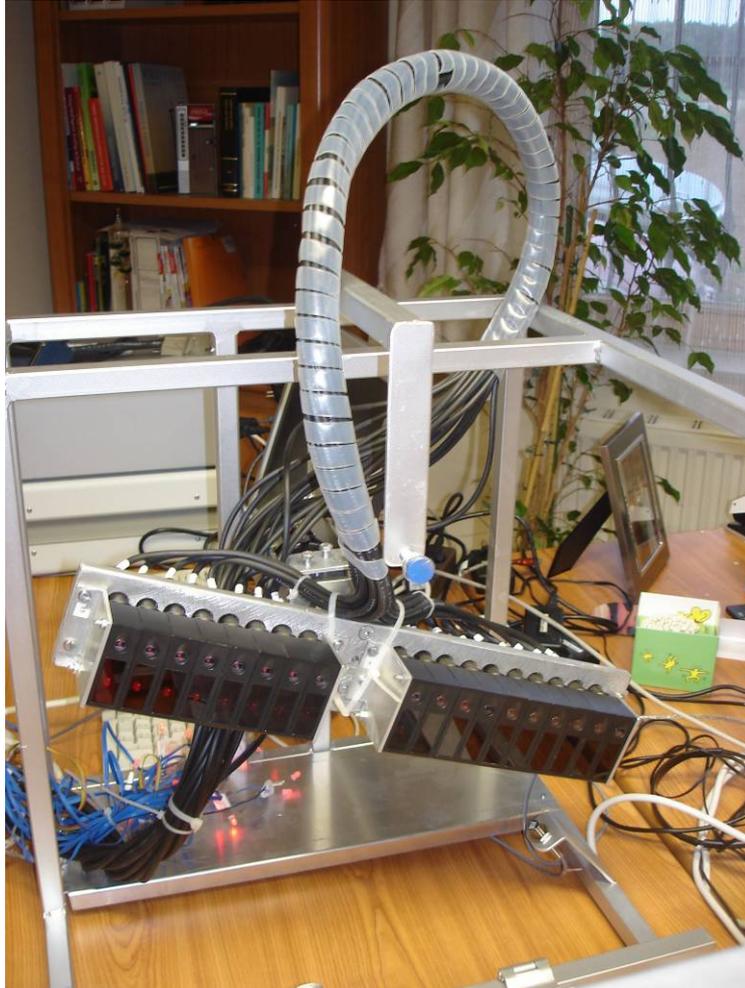
**Abb. 5: Laserabtastung der Probenoberfläche durch den LaBaCuS.**

Aus der Entwicklung dieses Messsystems leiten sich der Antrag auf ein Europäisches Patent Nr. 06 450 132.3, sowie die ÖNORM A 1105 ab.

#### **4.1.2. Steigerung der Präzision des Curl-Messgerätes (MoMiLa)**

Für dieses Projekt war dieser erste Ansatz zwar bedeutend, aber in seiner Präzision war das System noch nicht dort, wo wir es benötigen würden. Daher wurde im Rahmen dieses Projekts ein nicht kommerzielles Nachfolgegerät entwickelt, das lediglich Forschungszwecken dienen soll. Die Neuerung liegt hauptsächlich darin, dass die Lasersensoren nicht mehr an exakt definierten achtzehn Punkten fixiert sind, sondern auf einem rotierenden Sensorträger montiert wurden, der mehrmals Abstandsmessungen durchführt. Auf diese Weise wird die Anzahl der erfassten Abstandspunkte auf etwa vierhundert erhöht. Die Vorteile sind, dass es ab sofort möglich ist, komplexere Verformungen im Papierblatt zu erfassen als die „normale“

Krümmung und dass die Probengröße nicht mehr auf ein Format von A4 beschränkt ist. Gerade ersterer Vorteil wird für Arbeiten für dieses Projekt besonders wichtig, weil wir nun ein detaillierteres Bild von den Auswirkungen von Verspannungen bekommen können und damit wesentlich mehr Aussagen über im Papierblatt enthaltene Spannungen treffen können. In Abb. 6 ist der neue MoMiLa (Mobiler Micro Laser Based Curl Scanner) gezeigt.



**Abb. 6:** Der MoMiLa als präzisere Variante des LaBaCuS

## **4.2. Zusammenhang zwischen Curl und Papierspannungen**

Curl, oder die Krümmung eines Blattes Papier, entsteht durch unterschiedliche Ausdehnung bzw. Kontraktion auf beiden Seiten eines Blattes Papier, ähnlich einem Bimetallthermometer. Eine Reihe von Faktoren wirken in der Ausprägung des Curls mit [8]: Zellulosefasern dehnen sich bei Aufnahme von Feuchte in Längsrichtung deutlich weniger als in Querrichtung. Durch unterschiedliche Befeuchtung (z.B. im Offsetdruck) oder Trocknung (z.B. beim Kopieren in der Fixiereinheit) des Blattes auf beiden Seiten expandiert bzw. kontrahiert eine Seite mehr als die andere, wodurch eine mechanische Spannung im Papierblatt entsteht. Als Folge krümmt sich das Blatt.

Ein weiterer möglicher Mechanismus entsteht aus dem Produktionsprozess, der die Fasern entlang der Maschinenrichtung ausrichtet, wodurch sich eine Anisotropie der Hygroexpansivität des Papierblattes ergibt. Ist nun diese Anisotropie auf einer Seite des Blattes stärker ausgeprägt als auf der anderen, so kann es zur Krümmung des Papiers kommen: Nimmt das Blatt als Ganzes Feuchte auf, z.B. durch Aufbewahren bei hoher Luftfeuchtigkeit, dehnt sich eine Seite stärker als die andere, wodurch wieder Curl entsteht.

Ein dritter Mechanismus entsteht, wenn zwar die Größe der Anisotropie auf beiden Seiten des Blattes gleich, der Winkel der Ausrichtung aber unterschiedlich ist. Auf diese Weise entsteht der Diagonal-Curl.

Das Sieb ist der wichtigste Ort, an dem Faserorientierungsanisotropie in das Blattgefüge eingebracht wird. Das Auslaufverhältnis, also das Verhältnis der Strahlaustrittsgeschwindigkeit aus dem Stoffauflauf zur Laufgeschwindigkeit des Siebes, und eventuelle Querströmungen bewirken die Ausrichtung der Fasern auf dem Sieb und stellen damit die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Curl-Neigung des Papiers dar [9].

#### **4.2.1. Die „Tension-Toy“ Software**

Die „Tension – Toy“ Software wurde programmiert, um dem Anwender eine möglichst genaue Vorstellung von dem Zusammenhang zwischen (superponierten) inneren Verspannungen in einem Papierblatt und den daraus resultierenden Verformungen zu geben. Als Materialkennwerte wurden typische Werte der Papierindustrie, mit besonderer Berücksichtigung von Bürokommunikationspapieren, sowie Durchschnittswerte unserer Qualitätsprüflabors verwendet. Das der Berechnung zugrunde liegende mechanische Modell stammt aus einer Vorlesung des mittlerweile emeritierten ord. Univ. Prof. Dr. Helmut Stark über Faserphysik, die Ende der neunziger Jahre an der Technischen Universität von Graz im Rahmen des Studiums über Papier- und Zellstofftechnik gehalten wurde.

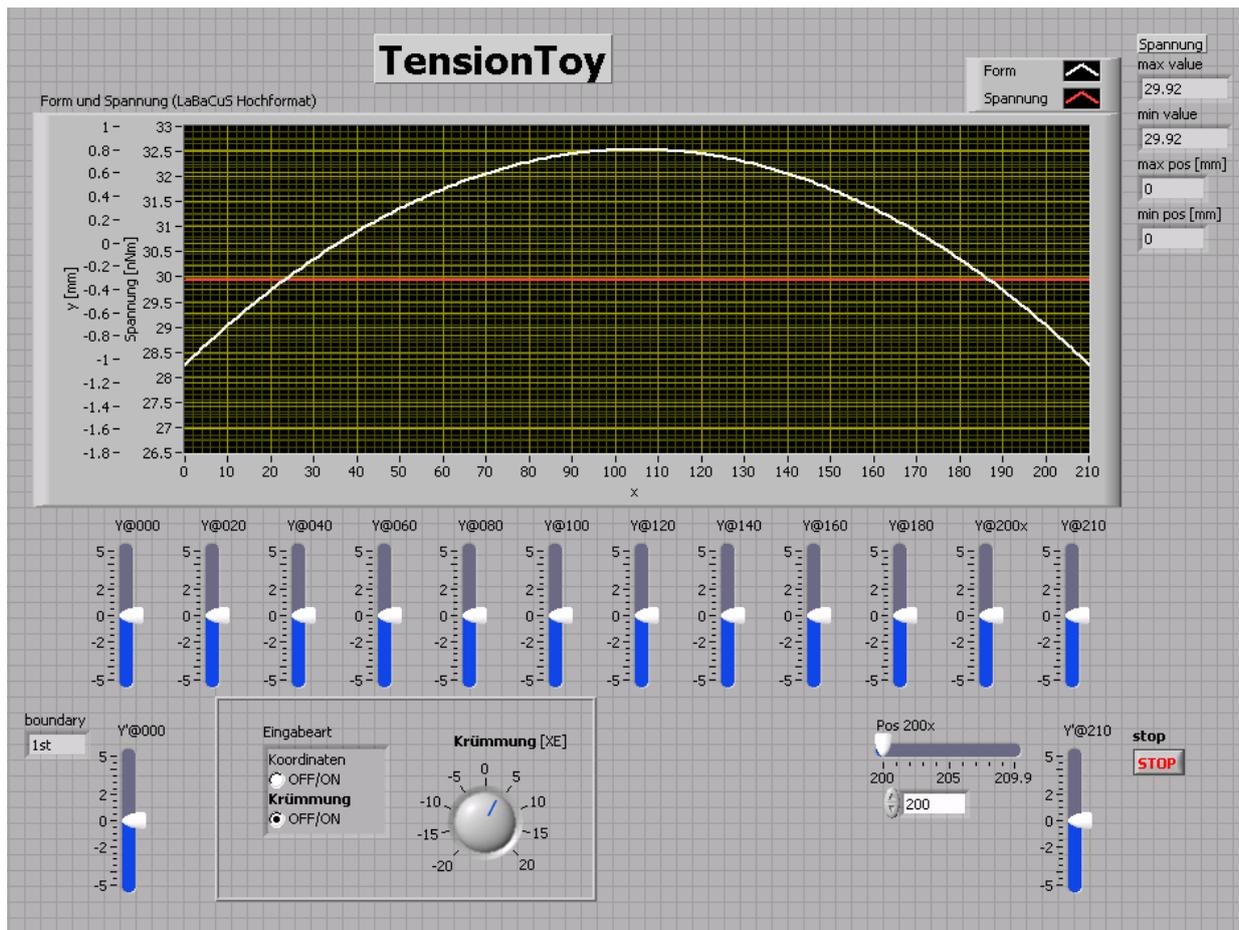
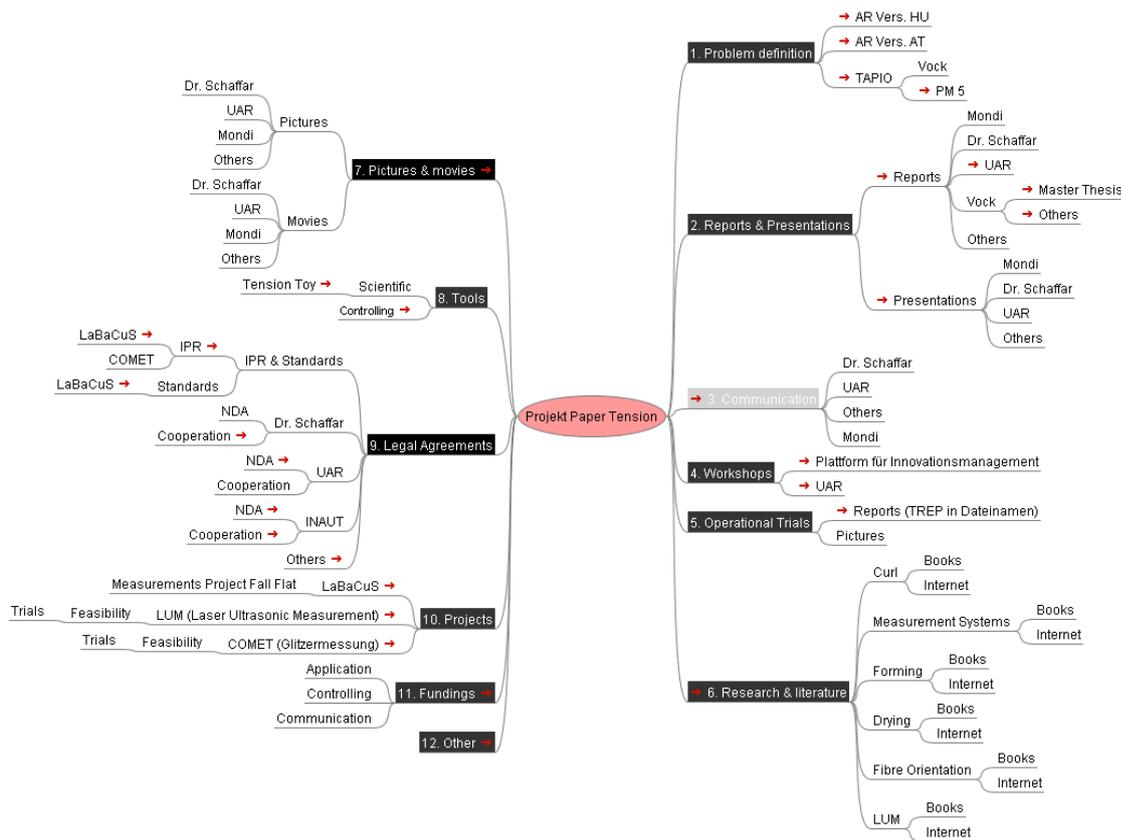


Abb. 7: Die „Tension-Toy“ Software mit der projizierenden Form des Blattes und den lokalen Spannungsreglern.

### 4.3. Lösungsansätze zur Früherkennung von Papierverformungen

Die im Folgenden dargestellte Grafik zeigt die für dieses Projekt erstellte Mind Map, die eine Vorstellung vom Grad der Komplexität des umgesetzten Projektes und vom Grad der Einbindung in verwandte Projekte bei Mondi Business Paper geben soll.

Angesprochen wird unter anderem ein geheimes Projekt namens „Fall Flat“, welches wir gemeinsam mit schwedischen und ungarischen Kooperationspartnern umsetzen und das ebenfalls Auswirkungen auf das endgültige Gesamtergebnis haben wird.



**Abb. 8: Mind Map des Projektes Papierspannungsmessung („Paper Tension Online (PTO) oder später als „Project Comet Storm“ bezeichnet).**

Wenn das Sieb und somit der Vorgang der initialen Blattbildung zum Zentrum der Betrachtung für diese Arbeit gemacht worden ist, dann gibt es einige Vorgänge, die erhöhte Aufmerksamkeit von den Papiermachern verlangen. Zu diesen gehören die Entwässerungsleistung bzw. -geschwindigkeit, die Retention von Fasern, Feinstoffen und Füllstoffen, die Bildung von Flocken oder das Entstehen von Mikro- und Makroturbulenzen und die Gleichmäßigkeit all dieser Einflussfaktoren in Maschinenlauf- und Querrichtung.

Einer der größten Herausforderungen am Sieb stellt jedoch die Bestimmung von Unregelmäßigkeiten von lokalen Suspensionsgeschwindigkeiten auf dem sich bewegenden Sieb dar. Auf der Suche nach geeigneten Möglichkeiten stößt man aber schnell auf verschiedene Grenzen. Wird beispielsweise eine lokale Strömungsrichtung über die strömungstechnisch verursachten Hauptorientierungsrichtungen der Fasern im Blatt bestimmt, so kann die mittlerweile auch online an der Papiermaschine mit Lasern bestimmt werden. Der entscheidende Nachteil aber ist, dass wir mit diesem optischen Verfahren höchstens die Auswirkungen solcher lokalen Strömungen an der Oberfläche eines Papierblattes feststellen können, aber keine Möglichkeit haben in die Tiefe des Blattes zu sehen. Nur eine zerstörende Offline-Prüfung des Blattes würde das über die Faserorientierungsmessung ermöglichen.

Die in die Tiefe des Blattes gehende Messung mittels Ultraschall scheidet an ihrer derzeitigen Umsetzung, weil eine Ultraschallsonde nur berührend messen kann. Das Aufsetzen eines Messensors auf eine Papierbahn im Trockengehaltsbereich von maximal 24% würde aber den sofortigen Bahnabriss bedeuten und würde eine Produktion unmöglich machen.

Die von einem amerikanischen Wissenschaftler der Technischen Universität von Georgia in Atlanta vorgeschlagene Methode des bildanalytischen Vergleichs von Wellenbildern liefert zwar exakte Ergebnisse in Laufrichtung und in Querrichtung, doch erfordert die Auswertung der Daten bis zum vernünftigen Ergebnis eine Rechenzeit auf dem Computer von bis zu 8 Stunden. Dies macht diese Methode für die Reduktion von Ausschuss sehr unpraktikabel und bietet eher akademischen Wert als wirtschaftlichen Nutzen.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit andere innovative Methoden in Betracht gezogen. Tab. 2 zeigt jene aus einem Brainstorming hervorgegangenen Ideen, die die ersten Plausibilitätsprüfung überlebten.

Nummer	Beschreibung	Status und Funktionswahrscheinlichkeit	Anmerkungen
1	Messung der Suspensionsgeschwindigkeit am Sieb durch die Messung der Korrelation des Wellenverlaufes der Suspension	Funktioniert, es bleibt aber das Risiko der Messungenauigkeit, weil Suspensionsgeschwindigkeit relativ zur Siebgeschwindigkeit gemessen werden soll	Messgenauigkeit muss über dem Auslaufverhältnis des Stoffauflaufes liegen, sonst bietet die Messung keine neuen Informationen an
2	Suspensionsquergeschwindigkeiten sollten sich aus dem Vergleich schräger Korrelationen der Wellen der Suspension am Sieb ermitteln lassen	Funktioniert theoretisch aber mit einem Genauigkeitsrisiko von über 40%	Teure Anschaffungskosten bei nicht sehr vielversprechender Genauigkeit gegenüber dem Auslaufverhältnis
3 bzw. 4	Gewinnen der Korrelationsinformationen durch optisches Vermessen von Schattenbildern der Wellen bei schiefem Lichteinfall	Information theoretisch vorhanden, Genauigkeit in Längsrichtung bei etwa 80% in Querrichtung bei etwa 50% angenommen	Genauigkeit der Messung ist ebenso fraglich wie in 1 und 2 jedoch wird die Messdichte höher erwartet wegen der höheren Messgeschwindigkeit
5 bzw. 6	<b>Gewinnen der Korrelationsinformationen durch optisches Vermessen des Glitzerns der Wellen bei schiefem Gegenlicht</b>	<b>Information theoretisch vorhanden, einfacher zu realisieren als Schattenbildermessung (3 bzw. 4)</b>	<b>Dies ist der tatsächlich umgesetzte Lösungsansatz!</b>
10	Aus der Form der Suspensionsoberfläche vor dem Auftreffen am Sieb lässt sich eventuell die lokale Suspensionsgeschwindigkeit ermitteln	Ungeprüft, sollte theoretisch funktionieren	Genauigkeit lässt sich noch nicht abschätzen

Nummer	Beschreibung	Status und Funktionswahrscheinlichkeit	Anmerkungen
13	Man kann Geschwindigkeiten und Richtungen mit zwei Hochgeschwindigkeitskameras um jeweils 70 k€ pro Stück vermessen oder durch die Sensoren einer einfachen Computermaus. In so einer (optischen) Maus sind ebenfalls Hochgeschwindigkeitskameras (bis 7000 Bilder pro Sekunde) eingebaut und die Auswerteelektronik ist ebenfalls bereits realisiert	Hat im Labor bei kontrastreichem Untergrund gut funktioniert und wird als sehr erfolgversprechend angesehen	Problematisch ist der Bedarf der Kamera nach einem hohen Kontrast der zu messenden Fläche. Hier wären hohe Beleuchtungsdichten unerlässlich.
21	Messung der lokalen Suspensionsdicke auf den Entwässerungsleisten	Offener Status aber sehr erfolgversprechend	Traversierende Verfahren sind höchstwahrscheinlich sehr aufwendig zu realisieren und benötigen einen Korrekturlaser zur Kompensation des Durchhangs
46	Ein durch die Suspension dringender Lichtstrahl verursacht Rückstrahlung, wenn er auf eine Flocke trifft. Ermittlung der Flockenverteilung möglich	Stationäre Versuche haben funktioniert	Die Suspension am Sieb ist leider zu undurchsichtig, daher versagt dieses Verfahren in der Praxis

**Tab. 2: Übersicht über die Lösungsansätze zur Früherkennung von Papierverformungen.**

Einige dieser Ideen werden nachfolgend genauer behandelt. Idee 21 wird in Kapitel 4.3.1 „Suspensionsdickenmessungen“ behandelt, Idee 10 in leicht veränderter Form im Kapitel 4.3.2 „Die Auftrefflinie des Strahles am Sieb“. Die Ideen 1 und 2 sind im Kapitel 4.3.3 „Geschwindigkeitsmessungen an der Suspension“ eingehender ausgeführt. Die letzten Endes zur Umsetzung gewählten Ideen sind die Ideen 5 bzw. 6. Diese werden im Kapitel 4.4 „Die Eule (OWL – Optical Wire Section Lookout)“ ausführlich behandelt.

#### 4.3.1. Suspensionsdickenmessungen

Wenn wir annehmen dürfen, dass das Entwässerungssieb an jedem einzelnen Punkt normal zur Lotrechten steht, dann sollte uns die Bestimmung der Dicke einer inkompressiblen Suspension über dem Sieb dabei helfen, die Volumenströme zu berechnen, die jeweils durch einen bestimmten Querschnitt in Maschinenquerrichtung fließt. Als hinreichende Näherungsformel gilt:

$$\frac{dV}{dt} = b_{PM} \cdot d_S \cdot \frac{dv_m}{dt}$$

mit  $dV/dt$  als Volumenstrom in  $m^3/s$ ,  $b_{PM}$  als Siebbreite der Papiermaschine,  $d_s$  als durchschnittliche Dicke der Suspension über dem Sieb und  $dv_m/dt$  als durchschnittliche Geschwindigkeit der Suspension an der Querschnittsstelle.

Wird der Volumenstrom nun an mehreren aufeinanderfolgenden Stellen auf dem Sieb bestimmt, so kann über die Differenz die Entwässerungsleistung einzelner Entwässerungselemente, zum Beispiel Foils, bestimmt werden. Von einem anderen Standpunkt aus betrachtet könnte, wenn die entsprechenden Entwässerungsleistungen bekannt sind auf die mittlere Suspensionsgeschwindigkeit rückgerechnet werden.

Zur Dickenbestimmung gäbe es zunächst drei Ansätze:

Die Entwässerungsleistung von oben, basierend auf der Annahme dass sich die Entwässerungsleisten (Foils) umso deutlicher optisch abzeichnen, je weniger Suspension darüber liegt, also je weniger Widerstand dem Licht geboten wird.



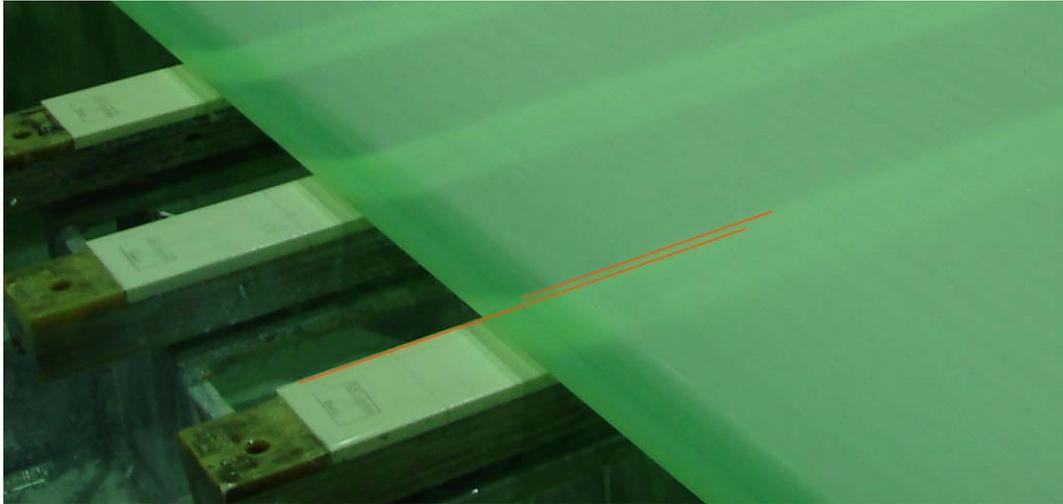
**Abb. 9: Aufnahme der PM 3, bei der die unter dem Sieb quer zur Bahn liegenden Entwässerungsleisten erkennbar sind.**

Die Entwässerungsleistung von unten, bei der die entzerrten Bilder einer Kamera verwendet werden sollen, um das nach unten abströmende Wasser mengenmäßig zu bestimmen.



**Abb. 10: Aufnahme des nach unten abströmenden Wassers unter dem Sieb der PM 3.**

Schließlich könnte die Suspensionsdicke auch noch über die Lichtbrechung bestimmbar sein.



**Abb. 11: Aufnahme eines Foils der PM 5 mit durch Brechung optisch versetzter Kante.**

Der Nachteil dieser Methode ist, dass hiermit keine lokalen Strömungsstörungen auf dem Sieb bestimmt werden können, sondern nur Durchschnittswerte über die Bahnbreite.

#### **4.3.2. Die Auftrefflinie des Strahles am Sieb**

Ausgehend von einem Druck, der innerhalb des Stoffauflaufes herrscht, wird diese Energie bei Verlassen des Strahles durch die Stoffauflauflippe in Geschwindigkeit umgewandelt. Durch Druckunterschiede im Querstromverteiler sowie dem eigentlichen Stoffauflauf, der Geometrie und Verarbeitung der Stufendiffusoren und Turbulenzgeneratoren, dem Einbringen von lokal unterschiedlichen Verdünnungswassermengen und variierender Spaltgeometrien in der Stoffauflauflippe kommt es letztendlich aber zu unterschiedlichen Austrittsgeschwindigkeiten des Suspensionsstrahles.

Abhängig von dieser Austrittsgeschwindigkeit ist der Strahl durch die Gravitationskraft unterschiedlich gekrümmt und trifft an einer anderen Stelle auf das sich bewegende Sieb.



**Abb. 12: Auftrefflinie des Suspensionsstrahles auf dem Sieb auf die Vorderkante des Brusttisches.**

Bei dieser Messmethodik spielt jedoch nur der Druckunterschied im Stoffauflauf eine Rolle und gibt keinen letztendlichen Aufschluss über das weitere Verhalten lokaler Strömungen auf dem Sieb.

### 4.3.3. Geschwindigkeitsmessungen an der Suspension

Weiters wäre es interessant die Suspensionsgeschwindigkeiten im Bereich des Stoffauflaufes und/oder des Siebes zu messen. Es wurde Versuche durchgeführt, in hoher Zeitauflösung mit einem Abstandssensor den Abstand zur Oberfläche der unter dem Sensor durchlaufenden Stoffsuspension zu messen. Durch Anbringen eines weiteren Sensors in Laufrichtung vom ersten und Kreuzkorrelation der beiden Sensorsignale kann die Zeit ermittelt werden, die ein bestimmtes Wellenmuster benötigt, um vom ersten Sensor zum zweiten zu gelangen. Aus dieser Versatzzeit und dem Abstand der Sensoren lässt sich die Geschwindigkeit der Strömung bestimmen.

Um die Erfolgswahrscheinlichkeit zu erhöhen, wurde dieser Versuch mit verschiedenen Sensoren (s. Anhang, Kapitel 7.4 „Die Sensoren“) durchgeführt. Der Versuchsaufbau war provisorisch und daher sehr einfach gehalten.

An dieser Stelle wird es nun notwendig zwischen zwei verschiedenen Messorten in der Siebpartie zu unterscheiden (siehe untenstehende Skizze):

M1 der Bereich des Strahles der weiter oben als Messort herangezogen worden ist

M2 der Bereich auf dem Sieb (hier zwischen dem ersten und den zweiten Foil-Gruppen (F1 und F2))

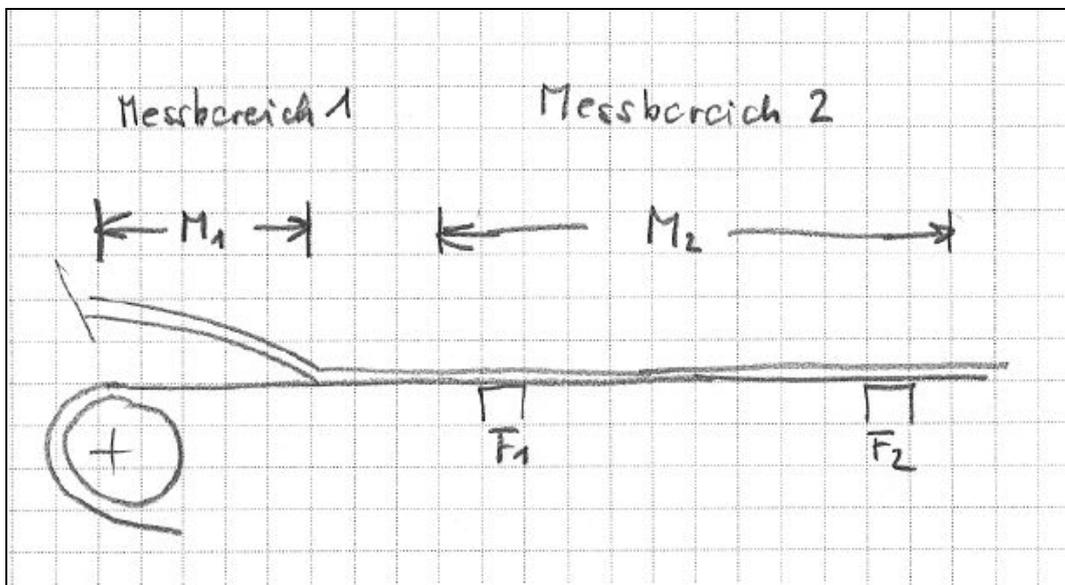


Abb. 13: Skizze über die beiden Messbereiche am Sieb M1 und M2.

In diesem Projektschritt arbeiteten wir nur mit Abstandssensoren nach dem Triangulationsprinzip. Diese Sensoren müssen vor einem direkten Glitzern der Suspension noch geschützt werden, deswegen wurde zunächst eine schräge Montage unter 20° (nachlaufend) in Betracht gezogen.

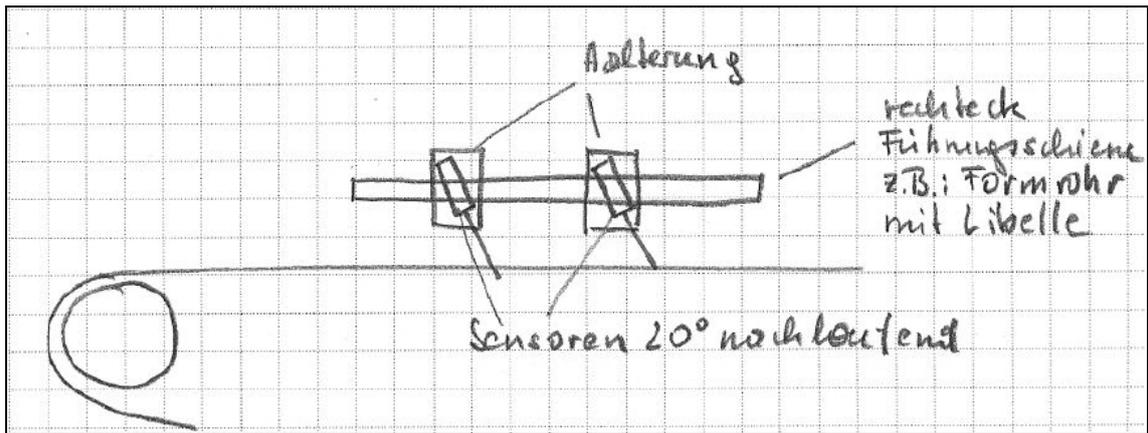


Abb. 14: Skizze über den geplanten Aufbau der Sensoren an der PM 5.

Der optimale Abstand zwischen den Sensoren hängt dabei weitestgehend von der Wellenlänge der Oberflächenstruktur der Stoffsusension ab und wurde in verschiedenen Aufbauten praktisch erprobt. Praktisch sah dies so aus, dass auf den Träger eine Messlatte befestigt wurde, um den Abstand im Versuch möglichst exakt abzuschätzen.

Für die Versuche wurde ein Trägerrahmen in den ersten Teil der Siebpartie der Papiermaschine 5 aufgebaut, an dem die Sensoren befestigt werden konnten.

Im Folgenden zeigt eine weitere Skizze den prinzipiellen Aufbau der Sensorenhalterung, die an den Trägerrahmen der PM5 befestigt wurden.

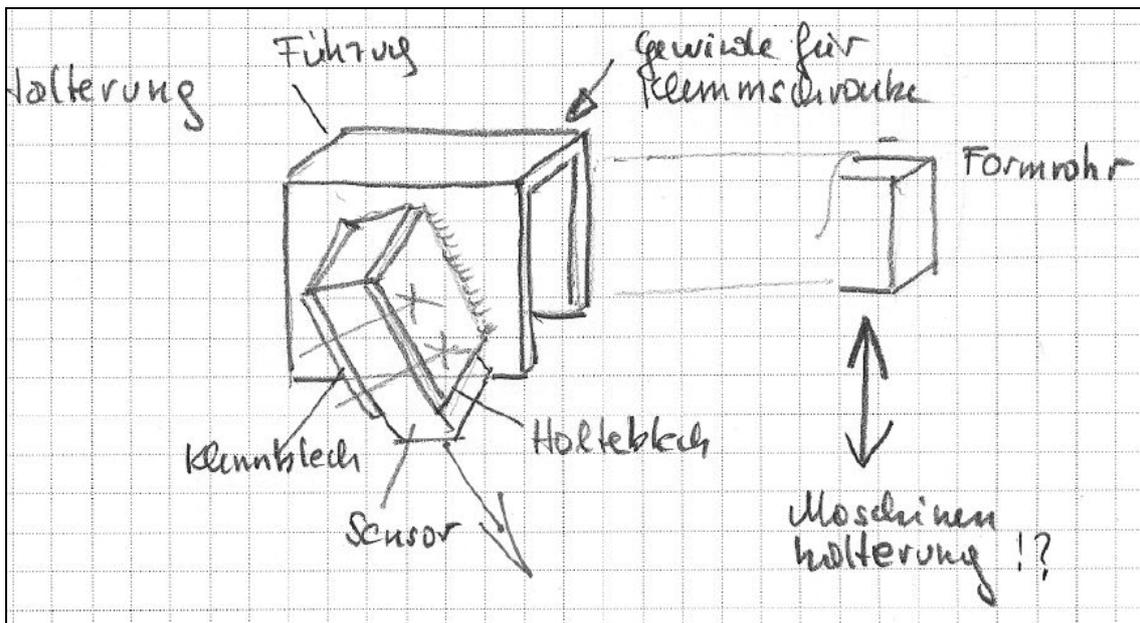
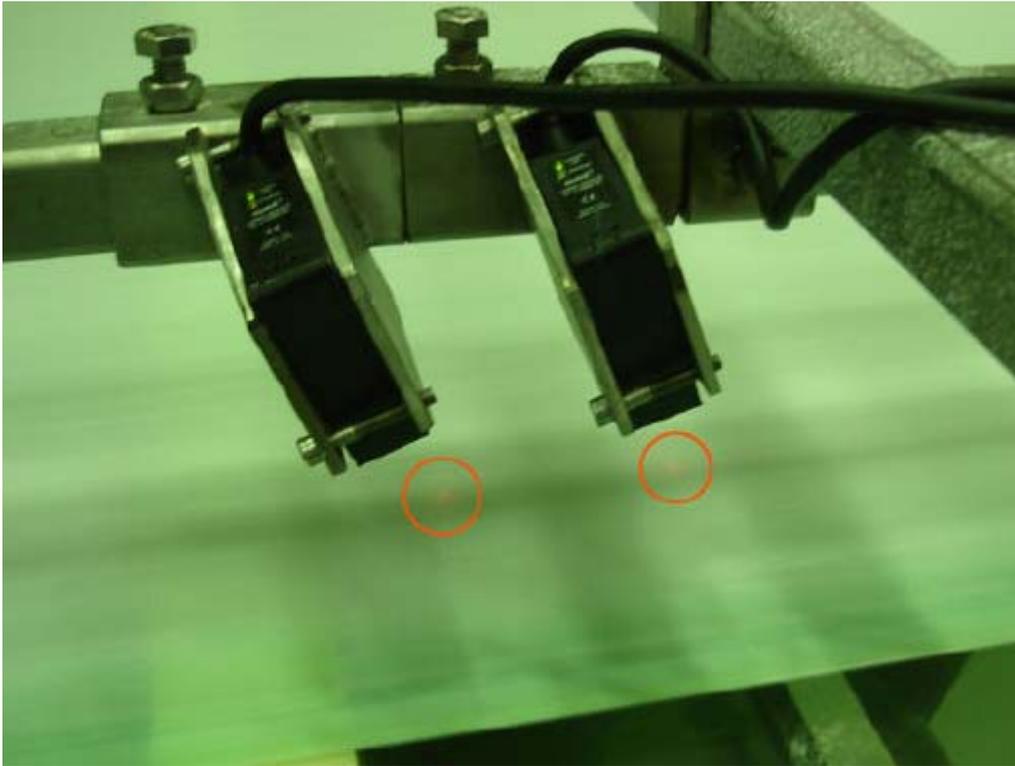


Abb. 15: Skizze über den geplanten Aufbau der Sensorenhalterung an der PM 5.

#### 4.3.3.1. Die Messung am Sieb



**Abb. 16: Praktischer Einsatz der Sensoren im Versuch an der PM 5.**

Dies ist ein etabliertes Messverfahren aus der Automobilindustrie, mit dessen Hilfe Fahrzeuggeschwindigkeiten aus einem Fahrzeug heraus, ohne die bekannten Fehlerquellen des Tachometers wie Reifendruck, Temperatur und anderen, gemessen werden können. Die Messung erfolgt über den Vergleich der farblichen Änderung des Fahrbahnbelages. Als problematisch erwies sich hier der Kostenfaktor. Eine (nur stationär mögliche) Messeinheit bräuchte, selbst wenn sie traversierend konstruiert wäre, mehrere Messköpfe die jeweils im Kostenbereich über 10.000 Euro liegen würden. Der maschinenbauliche Aufwand zur Aufrechterhaltung der Messgenauigkeit wäre ebenfalls bedeutend. Es stellt sich die Frage nach einer billigeren Lösung, die zudem von einer Papiermaschine an die andere transportiert werden kann.

## 4.4. Die Eule (OWL – Optical Wire Section Lookout)

### 4.4.1. Vorbemerkungen

In diesem Text ist immer von "Vektoren" die Rede. Das ist allerdings nur bedingt exakt, weil die gemessenen Geschwindigkeiten bezüglich der Richtung nicht eindeutig sind – es ist dem System nicht möglich, die Richtungen „von rechts nach links“ und „von links nach rechts“ zu unterscheiden – im Gegensatz zu einem menschlichen Beobachter, dem dies leichter fällt.

Die Vektoren sind in der derzeitigen Entwicklungsstufe weiters ihrem Betrag nach unbestimmt.

Alle Bewegungen, Positionen und Strömungen im OWL System beziehen sich immer auf die Bildebene und nicht auf die Siebebene, dasselbe gilt für die Richtungen.

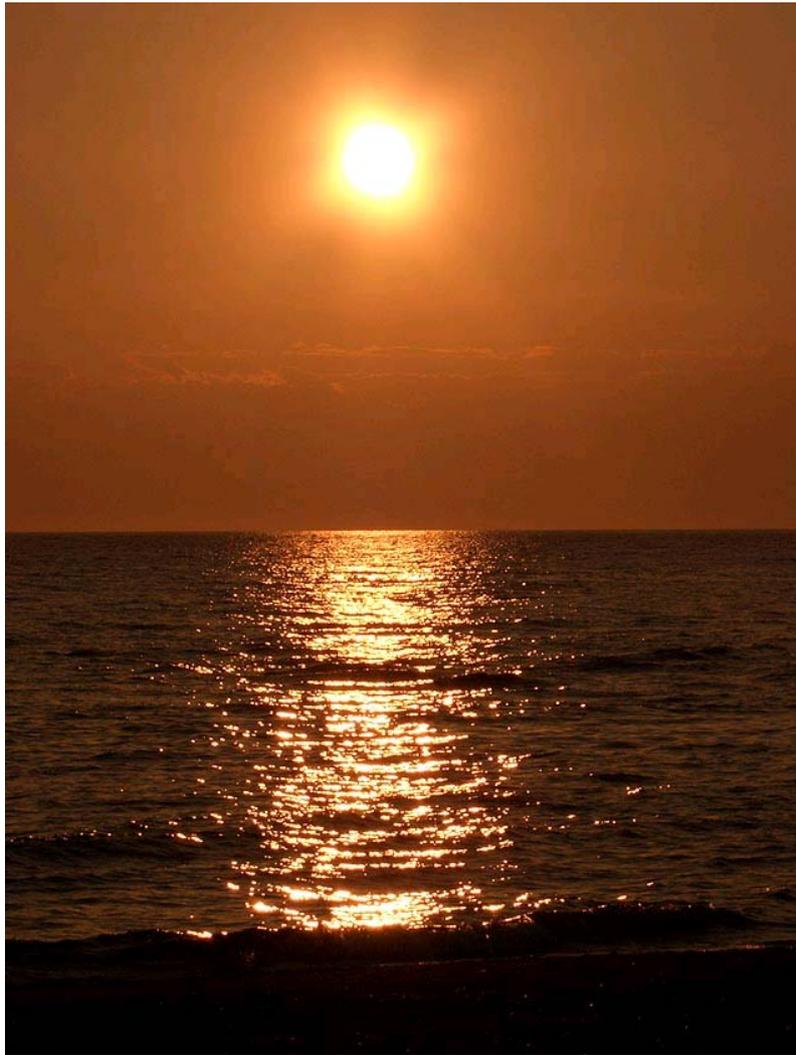
In der derzeitigen Entwicklungsstufe werden keine perspektivischen Effekte berücksichtigt, d.h. die Umrechnung auf die Siebebene wird nicht durchgeführt.

#### **4.4.2. Technische Grundlagen**

Das Sieb einer Papiermaschine kann sich sehr schnell bewegen, bis über 1000 m/min. Das Sieb wird über die Brustwalze geführt, wenn es waagrecht läuft wird ein Suspensionsstrahl von beispielsweise 1 cm Dicke mit nahezu derselben Geschwindigkeit auf das Sieb „aufgespritzt“. Auf den nächsten Metern wird bei einer Langsiebmaschine das Wasser durch Gravitation und unter dem Sieb liegende „Foils“ herausgezogen, die Flüssigkeitsschicht wird also immer dünner.

Man kann die Strömungen auf dem Sieb einer Papiermaschine nicht unmittelbar messen, da die Strömung nicht beeinflusst werden darf. Bekannt ist ein sehr aufwendiges Verfahren, das mit einer Reihe Hochgeschwindigkeitskameras die Bewegung von Bläschen am Sieb verfolgt und daraus Geschwindigkeitsvektoren an der Oberfläche berechnet.

#### 4.4.3. Das Messprinzip



**Abb. 17: Stimmungsvolle Illustration des Messprinzips der Eule. An den Wellenkämmen entstehen Reflexionen. Die Bewegung der Wellen lässt sich aus der Bewegung der Reflexionspunkte ermitteln.**

Stochastische Wellen am Sieb reflektieren Licht. Das ist an und für sich nichts Unbekanntes. Bei so seichten Flüssigkeitsständen ist außerdem die Phasengeschwindigkeit

$$c = \sqrt{g \cdot d}$$

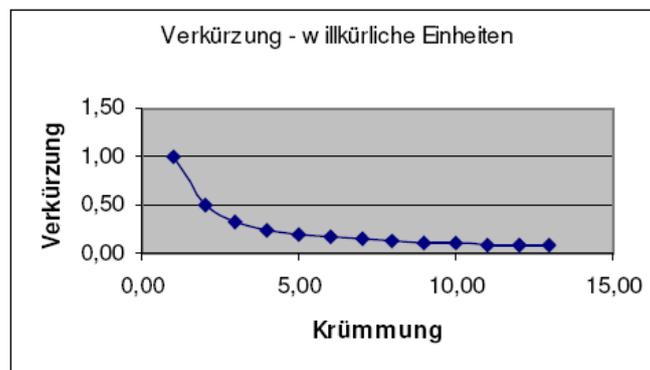
(mit  $c$ ...Phasengeschwindigkeit,  $g$ ...Gravitationskonstante,  $d$ ...Suspensionstiefe) der Wellen mehr als eine Größenordnung langsamer als die Transportgeschwindigkeit auf dem Sieb und kann daher vernachlässigt werden. Somit bewegen sich die Wellen mit dem Medium, was auch herrschende Literaturmeinung ist. Die Wellenfronten reflektieren eine gegenüber befindliche starke Lichtquelle (s. Abb. 17). Bei fotografischen Aufnahmen mit entsprechend kurzen Verschlusszeiten ergibt sich eine Punktwolke. Die beobachteten Reflexionen bewegen sich in etwa mit der Geschwindigkeit der Wellen. Der Unterschied zwischen der Bewegung der Welle und der Reflexion ist einfach erklärt:

Man denke sich die Suspensionsoberfläche an einer Stelle näherungsweise als eine Kugel.



**Abb. 18: Analogie der Suspensionsoberfläche mit einer reflektierenden Christbaumkugel.**

Man erkennt leicht die Spiegelung der Beleuchtung. Dieser Punkt bleibt aber, wenn man die Christbaumkugel nach links bewegt, nicht auf dieser Stelle (relativ zur abgebildeten Kreisfläche) sondern ist dann weiter rechts. Die Bewegung der Spiegelung ist also etwas geringer als die Bewegung der Christbaumkugel. Diese scheinbare Verringerung des Weges ist von der Krümmung des reflektierenden Objektes abhängig. Ist die Krümmung<sup>1</sup> sehr groß, ist die Bewegung der Spiegelung identisch mit der Bewegung des Objektes, man denke an eine Nadelspitze. Bei sehr geringen Krümmungen ist die Bewegung der Spiegelung Null, selbst wenn das Objekt bewegt wird – man denke an einen plan geschliffenen bewegten Spiegel. Dieser Zusammenhang kann wie folgt grafisch charakterisiert werden (geschätzte Kurve):



**Abb. 19: Zusammenhang zwischen der Krümmung der spiegelnden Oberfläche und der Verkürzung des scheinbar zurückgelegten Weges.**

Die Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung des „Glitzerpunktes“ kann nun auf zwei verschiedene Weisen gemessen werden: Im Korrelationsverfahren oder im Glitzerverfahren.

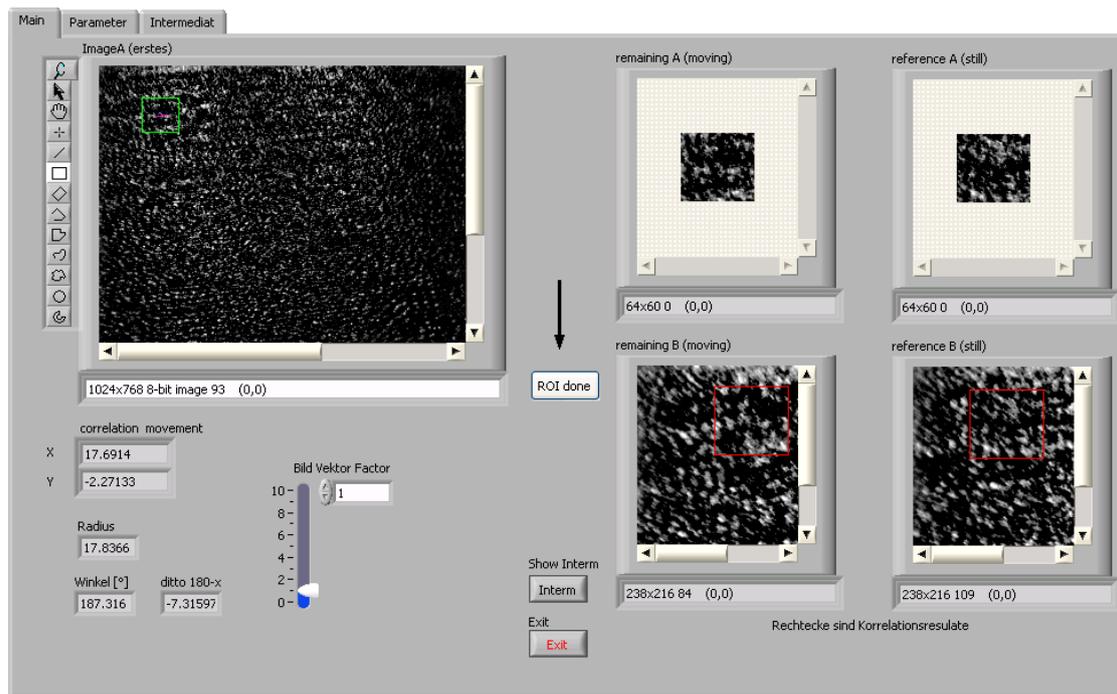
<sup>1</sup> Die Krümmung ist der Kehrwert der Radius.

#### 4.4.4. Das Korrelationsverfahren

Hier wird mit zweidimensionaler Korrelation die Verschiebung der Punkte nach einer gewissen Zeit ermittelt. Die zwei Aufnahmen werden vorzugsweise mit zwei verschiedenen extern getriggerten Kameras gemacht. Dabei wird ein Bildteil ausgewählt und dieses Punktmuster in der zeitversetzten Aufnahme gesucht. Der Ortsversatz zwischen den Kameras wird durch einen Satz Bilder, die gleichzeitig aufgenommen wurden, ermittelt. Durch Subtraktion der beiden Vektoren ergibt sich die gesuchte Bewegung der Strömung auf dem Sieb.

##### 4.4.4.1. Technische Vorgehensweise

1. Aufnahmeblock 1
  - a. Optischer Filter (optional)
  - b. Objektiv (optionaler Zoom)
  - c. Videokamera
  - d. Kabel zur Auswerteeinheit (vorzugsweise Computer)
2. Aufnahmeblock 2 wie Aufnahmeblock 1 – in unmittelbarer Nähe montiert
3. Zusammenführung der Daten zur Auswerteeinheit
4. Man wähle eine Belichtungszeit, in der sich die Flüssigkeit (Suspension / Sieb) im Rahmen der Auflösung der Kamera „fast“ nicht bewegt. Praxisbeispiel 1/20.000 s, das ist bei 10 m/s ein vernachlässigbarer Weg von 0,5 mm
5. Gleichzeitige Aufnahmen mit den zwei Kameras repräsentieren im Musterversatz die verschiedene Perspektive der zwei Kameras
6. Versetzte Aufnahmen (Praxisbeispiel 3 ms) mit den zwei Kameras repräsentieren im Musterversatz die den Versatz durch die Bewegung plus den Versatz durch die verschiedene Perspektive
7. Optional Bildaufbereitung durch Festlegung eines ROI (Region Of Interest)
8. Optional Bildaufbereitung durch Veränderung von Bildparametern wie Gamma, Kontrast und Helligkeit
9. Optional Bildaufbereitung durch Konvolution wie „Contour Extraction“, Fourierbefilterung oder andere Verfahren
10. Durch zweidimensionale Korrelation oder Pattern Matching kann der „Versatz“ zwischen Mustern auf verschiedenen Bildern ermittelt werden (Abb. 20).



Tab Control

**Abb. 20: Ermittlung der Korrelation zwischen zwei zeitversetzt aufgenommenen Bildern.**

11. Der Versatz durch die Bewegung minus den Versatz durch die verschiedene Perspektive ergibt die Geschwindigkeit mal dem Zeitversatz des Musters, des gewählten Bildteils.
12. Wird dieses Verfahren mit verschiedenen Bildteilen durchgeführt, kann man ein Strömungsvektorfeld erzeugen
13. Umrechnung des Strömungsfeldes auf Perspektivenrichtigkeit (Draufsicht auf die Sieb-ebene)

#### 4.4.5. Das Glitzerverfahren

Bei diesem Verfahren wird nur eine Aufnahme gemacht, diese aber dafür mit einer wesentlich längeren Verschlusszeit, z.B. 1/1.000 s. Dadurch ergeben die bewegten Leuchtpunkte „Stricherln“ – vergleichbar mit Nachtaufnahmen von belebten Straßen, bei denen die Leuchtspuren der Scheinwerfer, nicht aber die Fahrzeuge selbst zu sehen sind. Diese Stricherln sind in der Richtung der Bewegung aber nicht unbedingt in der Länge der Geschwindigkeit proportional. Dies deshalb, da der richtige Winkel zur Reflexion der Lichtquelle in die Kamera stochastisch entsteht und nach einiger Zeit vergeht. Mit anderen Worten, die Stricherln können nicht länger sein als es sich auf der Strömungsgeschwindigkeit ergibt, aber sie können sehr wohl kürzer sein. Dieser Effekt ist vor allem an den Rändern der reflektierenden Fläche zu beobachten, da eben hier die Spuren entstehen und auf der anderen Seite wieder vergehen. Die mittleren Stricherln entsprechen daher „meist“ der sich aus der Geschwindigkeit ergebenden Länge. Durch eine perspektivenrichtige Auswertung der Strichlängen und Suche z.B. nach dem Median der Strichlängen – kann eine Maßzahl für die herrschende Geschwindigkeit ermittelt werden.

#### 4.4.5.1. Technische Vorgehensweise

1. Aufnahmeblock 1
  - a. Optischer Filter (optional)
  - b. Objektiv (optional Zoom)
  - c. Videokamera
  - d. Kabel zur Auswerteeinheit (vorzugsweise Computer)
2. Man wähle eine Belichtungszeit, in der sich die Flüssigkeit (Suspension / Sieb) um einen mit der Kamera gut messbaren Weg bewegt. Praxisbeispiel 1/1.000 s, das ist bei 10 m/s 10 mm
3. Optional Bildaufbereitung durch Festlegung eines ROI (Region Of Interest). Damit können fixe Maschinenteile ausgeblendet werden.
4. Optional Bildaufbereitung durch Veränderung von Bildparametern wie Gamma, Kontrast und Helligkeit
5. Optional Bildaufbereitung durch Konvolution wie „Contour Extraction“
6. Optional Bildaufbereitung durch Übergang auf ein binäres Bild z.B. durch ein Threshold, beispielsweise Niblack
7. Optional Bildaufbereitung durch Erstellung einer Distance Map z.B. Danielson
8. Optional Bildaufbereitung durch Watershed Segmentierung
9. Partikelanalyse nach Area, Convex Hull, Orientation, Ratio/Ellipse, Center of Mass X, Center of Mass Y
10. Entfernung von Partikel die offensichtlich keine gültigen Lichtspuren sind (z.B. durch lokale Überbelichtung) z.B. die ein Verhältnis ConvexHullArea/Area überschreiten
11. Begrenzung der auszuwertenden Bildfläche auf Regionen, die viele Messpunkte enthalten da ansonsten ohne Stützwerte, die Werte unsinnig extrapoliert würden (s. Abb. 21)

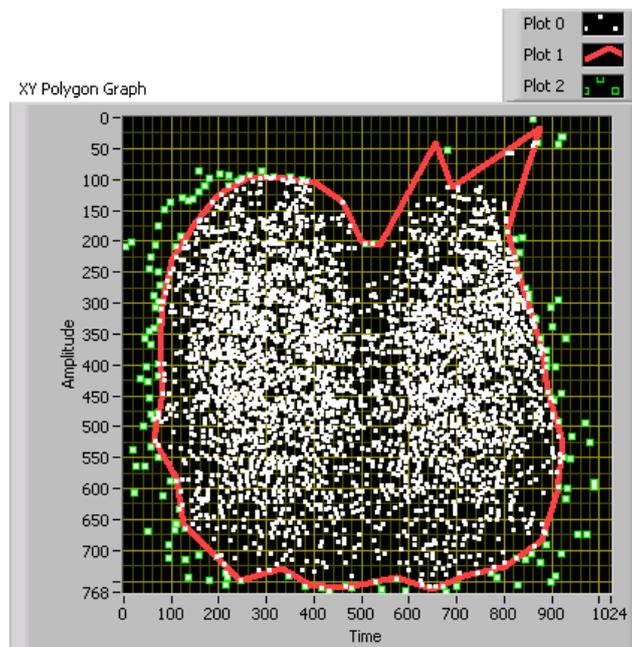
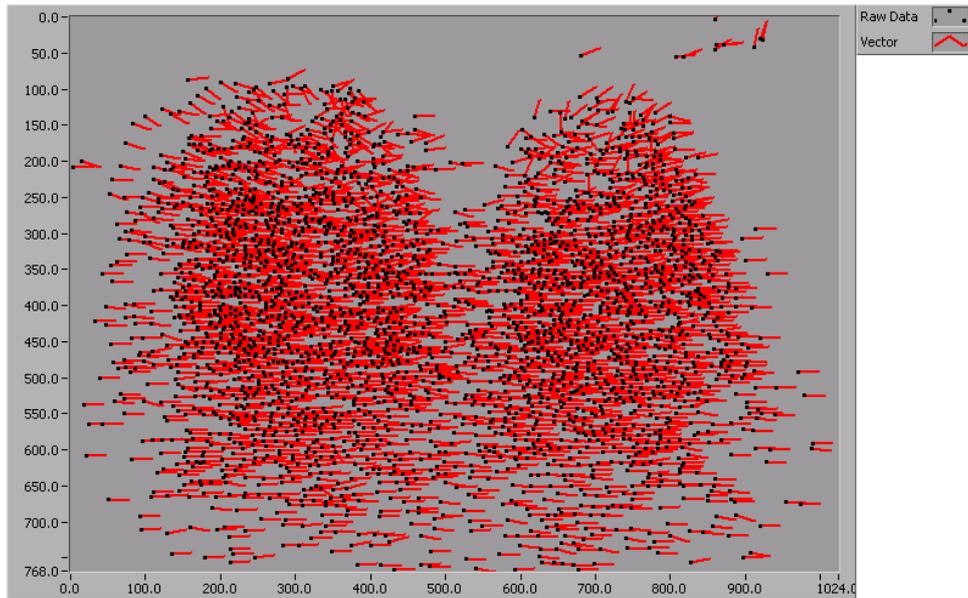


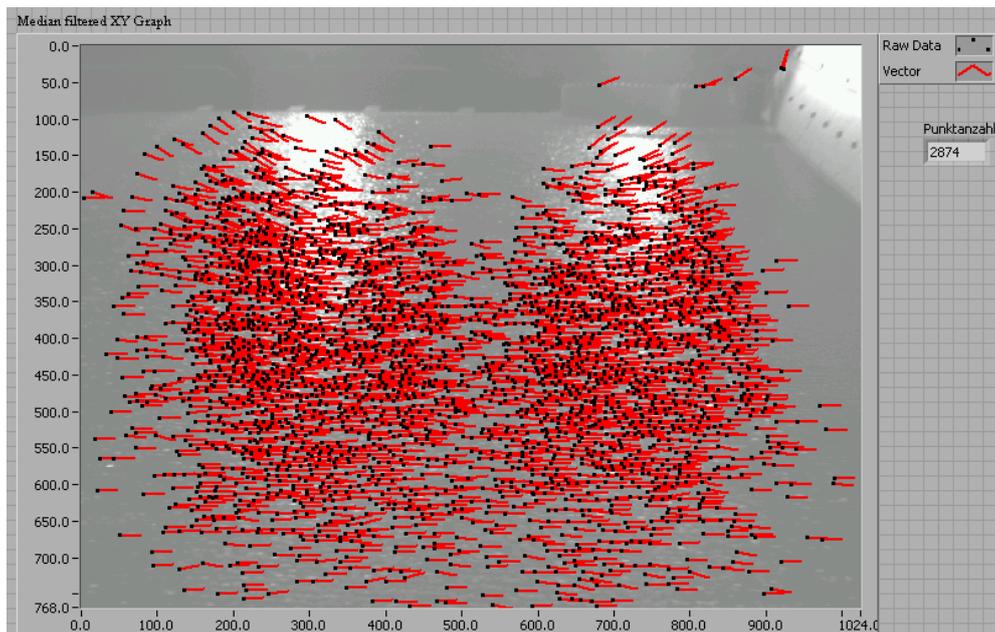
Abb. 21: Etwa 10% der Werte im äußeren Bereich des Messfeldes werden verworfen.

12. Ermittlung von Rohvektoren aus der Partikelanalyse. Die Rohvektoren lassen die Struktur der Strömung bereits gut erkennen (Abb. 22)



**Abb. 22: Rohvektoren.**

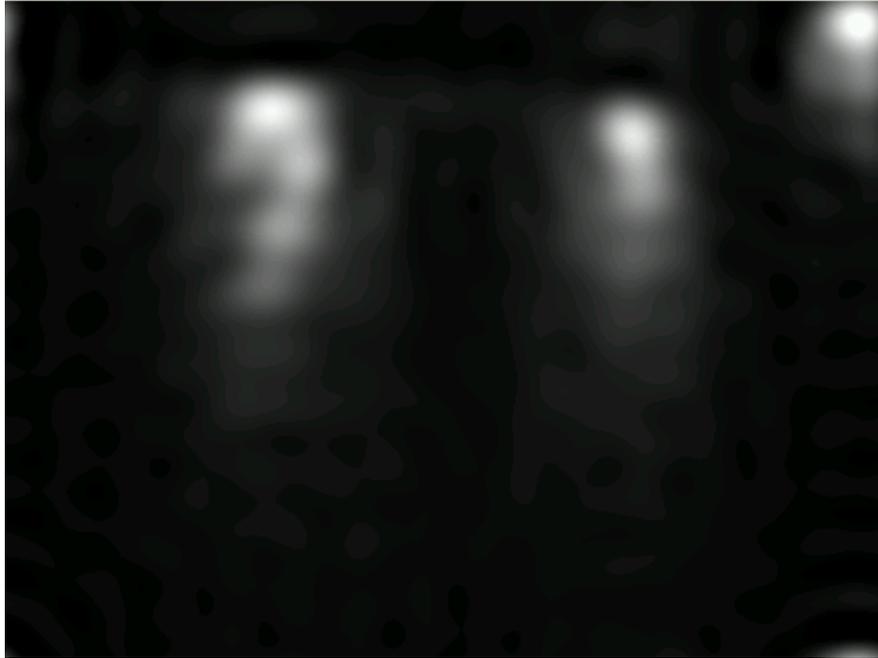
13. Medianbefilterung der Vektoren, um Ausreißer aus der Auswertung zu nehmen, wobei die Strukturen sofort besser zu erkennen sind:



**Abb. 23: Rohvektoren nach Medianbefilterung.**

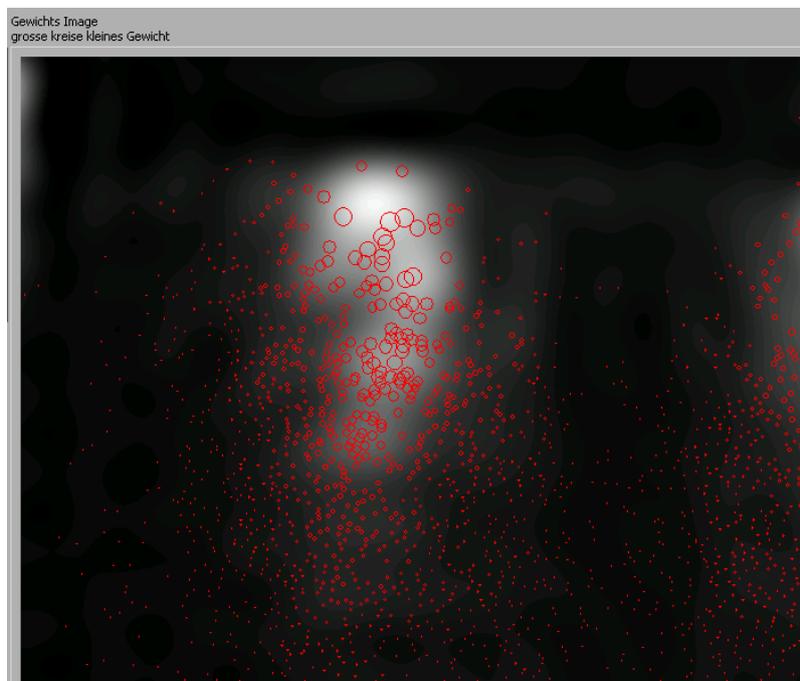
14. Naturgemäß sind Vektoren in überbelichteten Bereichen, die sich bei diesem Verfahren oft nicht vermeiden lassen, unsicherer als in anderen Gebieten. Die Überbelichtung kommt ja teilweise dadurch zustande, dass sich mehrere Glitzerspuren überlappen. Dadurch wird die Zuordnung einer Richtung zur Glitzerspuren erschwert. Es empfiehlt sich, aus den Bilddaten eine Gewichtsfunktion zu ermitteln, die die Vektoren in den unsicheren

Bereichen weniger stark gewichtet. Am einfachsten geschieht dies über die lokale Lichtstärke (Abb. 24).



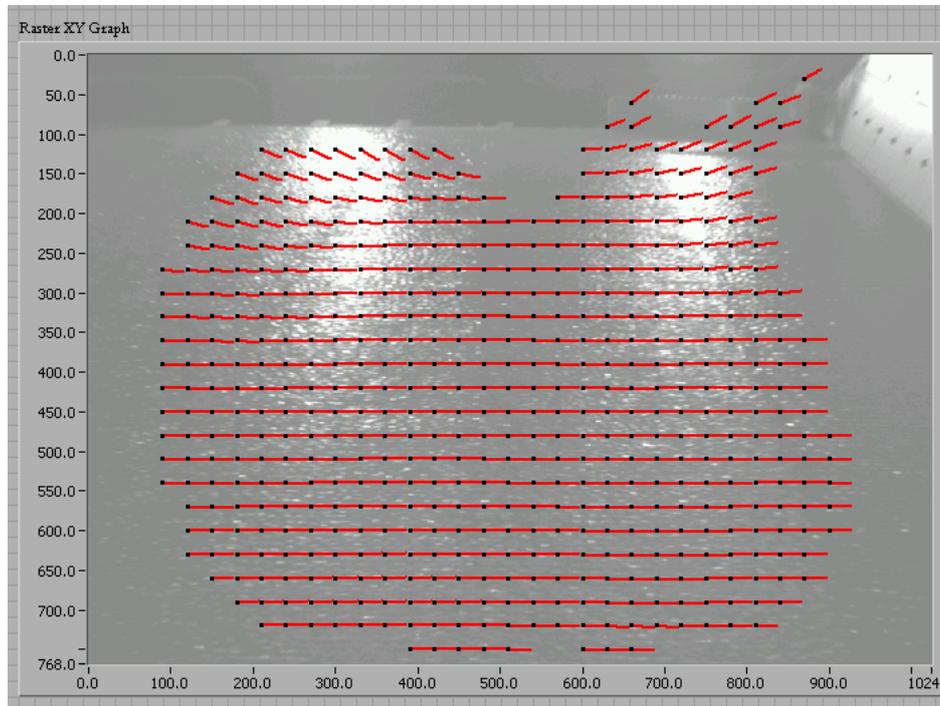
**Abb. 24: Aufnahme nach Anwendung eines Glättungsfilters, um die stark beleuchteten Bereiche zu ermitteln. In diesen Bereichen sollen die Vektoren weniger stark gewichtet werden.**

15. Die Vektoren in den unsichereren Gebieten werden mit geringeren Gewichten versehen (Abb. 25).



**Abb. 25: Die Vektoren werden entsprechend der Belichtung gewichtet. Größere Kreise entsprechen einem geringeren Gewicht.**

16. Das zweidimensionale Vektorfeld wird durch eine vierdimensionale Splinefläche repräsentiert, damit man an fixen Punkten die errechnete Strömungsform darstellen kann. (Abb. 26).



**Abb. 26:** Das aus den gewichteten Rohvektoren gebildete Spline-Vektorfeld. Dieses erlaubt einem menschlichen Beobachter bessere Vergleiche von einem Bild zum nächsten. Die Strömung rechts oben ist ein Artefakt und entsteht durch Reflexionen an Maschinenteilen. Dies ließe sich durch Definition einer Region of Interest verhindern. Die hinter das Spline-Vektorfeld gelegte Aufnahme ist nicht die, die zur Ermittlung der Strömung herangezogen wurde, sondern wurde mit wesentlich längerer Belichtungszeit aufgenommen und dient in der Praxis zur Orientierung an der Papiermaschine.

17. Optionale Darstellungsmöglichkeiten:

- Ermittlung einer mittleren Strömungsrichtung
- Abzug der mittleren Strömungsrichtung, um Abweichungen von dieser deutlicher sichtbar zu machen
- Ermittlung und Markierung der größten Abweichung von der mittleren Strömungsrichtung (sog. „Hot Spot“)

18. Umrechnung des Strömungsfeldes auf Perspektivenrichtigkeit (Draufsicht auf die Siebebene)

#### 4.4.6. Das Messgerät

Sowohl das Korrelationsverfahren als auch das Glitzerverfahren wurden im Messgerät OWL (Optical Wire Section Look Out), zu Deutsch Eule, verwirklicht. Die für das Korrelationsverfahren notwendige Aufnahme von zwei Bildern mit genau definiertem zeitlichen Abstand wird durch zwei verschiedene getriggerte Kameras erreicht (s. Abb. 27).



**Abb. 27: Der Messkopf des OWL-Messsystems, mit dem Vor-Ort-Bildschirm und den beiden Objektiven, die dem System den Namen (OWL = deutsch „Eule“) gegeben haben. Links und rechts zwei herkömmliche Bauleuchten, die als Lichtquelle dienen und auf der gegenüberliegenden Seite des Siebes aufgestellt werden.**

Besonderes Augenmerk wurde auf die Praxistauglichkeit des Messgerätes gelegt. So ist das Gerät in der Siebpartie einer Papiermaschine extremen Beanspruchungen bezüglich Hitze und Feuchte ausgesetzt. Die Umgebungstemperaturen an der Siebpartie können über 40°C erreichen, bei nahezu 100% relativer Luftfeuchtigkeit. Die für die Auswertung in Echtzeit erforderliche Rechenkapazität in Kombination mit der notwendigen Kühlung verhindern bei der derzeitigen Technik noch den Einsatz eines Laptops als Auswerteeinheit (s. Abb. 28).



**Abb. 28: Messkopf und Computer des OWL-Messsystems im Transportkoffer verstaut.**

Um den Einsatz an anderen Papiermaschinen im Konzern zu ermöglichen, wurde das System so konzipiert, dass es sich in zwei Transportkoffern verpacken lässt (s. Abb. 29).



**Abb. 29: Das gesamte OWL-Messsystem inklusive Bauleuchten und Stativen kann in zwei Transportkoffern verstaut werden.**

## **5. Ergebnisse**

Sowohl für den Fördergeber als auch für Mondi Business Paper sind die folgenden Kriterien wesentlich für die Beurteilung der Ergebnisse dieses Projektes:

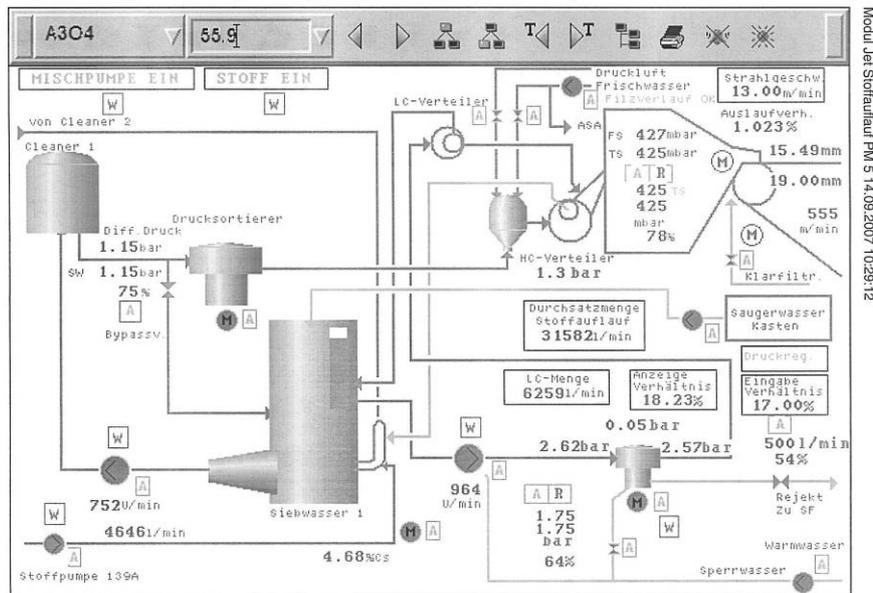
1. Nachweis, dass durch das entwickelte System wirklich der Wölbungsdefekt von Papier vorhergesagt werden kann. Nachdem das Ergebnisbild mit einer vernachlässigbar kleinen Verzögerung ausgegeben wird, sehen wir den zusätzlichen Beweis der deutlichen Frühzeitigkeit gegenüber der derzeitigen Qualitätskontrolle somit bereits als erbracht.
2. Nachweis, dass die durch das entwickelte System detektierbaren Probleme in ausreichendem Maß auftreten, um die Wirtschaftlichkeit dieser Entwicklung zu rechtfertigen.

Diese beiden Nachweise sollen im Folgenden erbracht werden.

### **5.1. Vorhersage der Wölbungsdefekte**

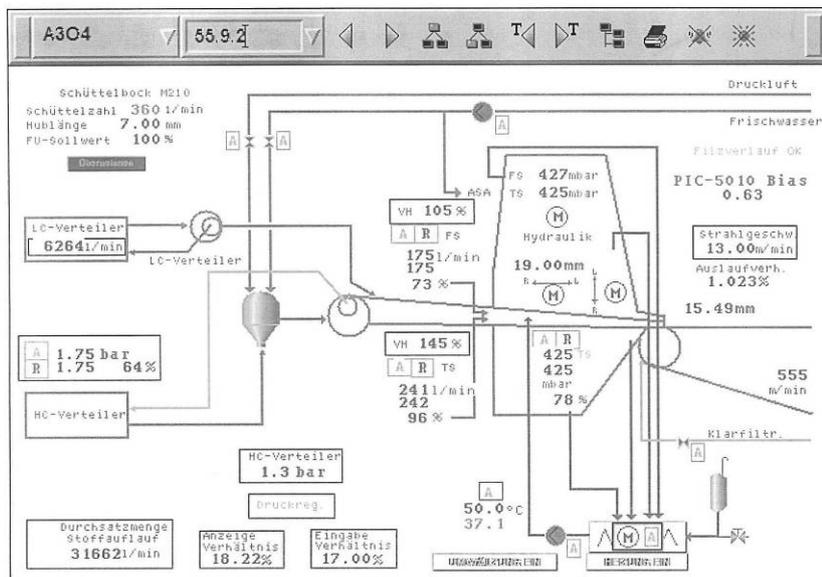
Für den ersten Nachweis wurden mehrere Parallelversuche an der Papiermaschine 5 gefahren, bei der bei laufender Produktion zeitgleich Daten durch das OWL System erhoben wurden und Proben durch das Qualitätslabor gesammelt und gemessen wurden.

Bei dem Maschinenversuch an der Papiermaschine 5 am 14. September 2007 wurden die Maschinenparameter festgehalten (s. Abb. 30 - Abb. 32).



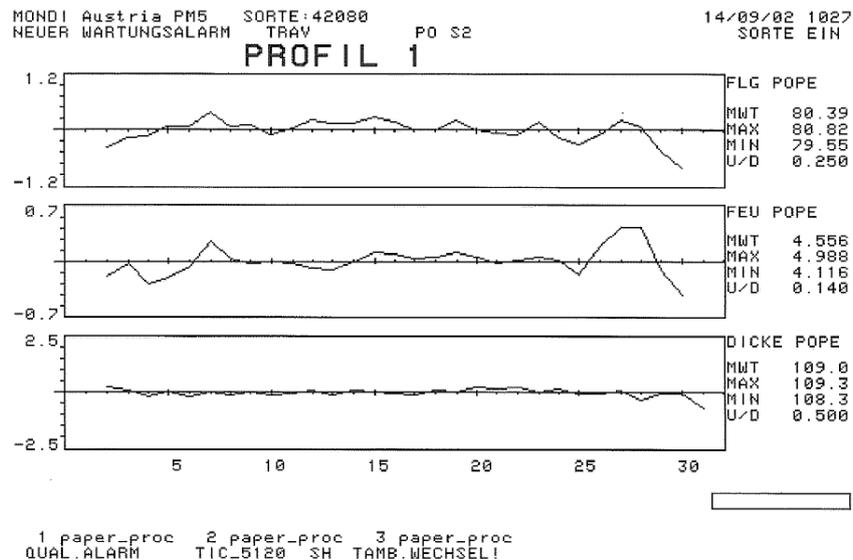
Modul Jet Stoffauflauf PM 5 14.09.2007 10:29:12

**Abb. 30: Ausdruck aus dem Prozessleitsystem, der die wichtigsten Prozessparameter im konstanten Teil (= Stoffzuführung zur Papiermaschine) angibt. Rechts oben der Stoffauflauf.**



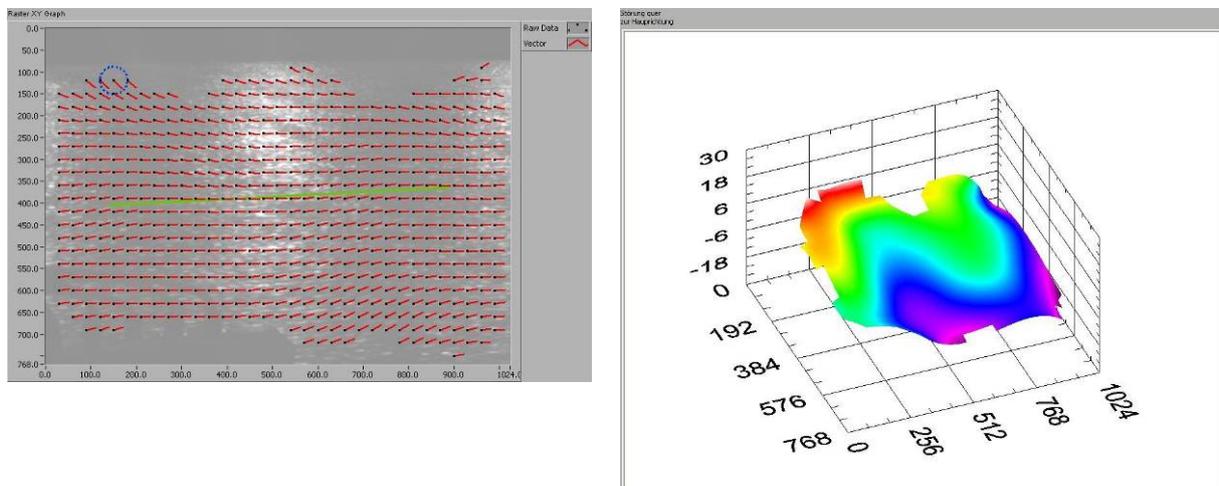
Modul Jet Stoffauflauf PM 5 14.09.2007 10:29:39

**Abb. 31: Detailsausdruck aus dem Prozessleitsystem, der die Daten des Stoffauflaufes angibt.**



**Abb. 32: Vom Qualitätsleitsystem vor der Aufwicklung gemessene Profile über die Breite der Papierbahn. V. o. n. u.: Flächengewicht, Feuchte, Dicke.**

Die Bilder, die mit dem OWL-System aufgezeichnet wurden (Abb. 33) zeigen einen sogenannten „Hot Spot“ in den Bahnen 5 bzw. 6. Sie weisen damit auf Probleme hin, die dort auftreten und die ein Problem mit Curl in diesen Bahnen vorhersagbar machen. Bemerkenswert ist die orange-rote Fläche im Störungsbild, die auf massive Störungen in der Bahn hindeuten und die ebenfalls an den Bahnen 5 und 6 zu finden waren.



**Abb. 33: Mit dem OWL-System ermittelte Strömungen auf dem Sieb. Links das Vektorbild mit mittlerer Strömung (grüne Linie) und Hot Spot (blauer Kreis). Rechts das Störungsbild, wobei dunkelblaue Bereiche die mittlere Strömung repräsentieren und andere Farben Abweichungen davon darstellen.**

Das Protokoll der Qualitätssicherung zeigt für diese Messung ein eindeutig nachzuweisendes Problem mit dem Curl in den Bahnen 5 und 6, also denselben Bahnen, in denen wir mit Hilfe des OWL-Systems den Defekt vorhergesagt haben. Dieses Ergebnis dient nur als repräsentatives Beispiel für eine Reihe von mehreren Versuchen, die wir in der Zwischenzeit an der Papiermaschine durchgeführt haben.

Mondi BP		Rechenlauf: 27/09/2007 12:55		REPRO - PROTOKOLL		Seite: 1	
PM	: PM05	Abrisse	:	Pruefer	:	Farka	
Mauftrnr:	50073112	Gesperrt	:	Datum	:	14/09/07	
Tambour	: 150450350 1	Farbe	:	Zeit	:	13:17	
Sortenrnr:	523080	Sorte	:	AR_Grp:	:	50	Version 1.20 rep_qf.sql

TM=944 Sp wg Wölbung - OK lt. Smekal

Kz	Nr	Bezeichnung	unit	loc	Bahn 1	Bahn 2	Bahn 3	Bahn 4	Bahn 5	Bahn 6	Bahn 7	Bahn 8	Bahn 9	Bahn 10	Bahn 11	Bahn 12	Mittel	Std.- Abw.	Ziel	Min	Max
X5	97	SCHUSS.V. KOP	SS			-10.00	-12.00	-12.00	-10.00	10.00							-6.80	9.44	.00	-20.00	20.00
	98	ROLIG V. KOP	SS		-10.00												-10.00	.00	.00	-12.00	12.00
	99	PH-GESCHWINDIG m/min			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00							1.00	.00			
	101	KRUEHM.RL. 2TK	SS		-10.00	-10.00	-10.00	-12.00	-10.00	-10.00							-10.33	.82	.00	-15.00	15.00
	102	KRUEHM.SCH.DUP	FS		10.00	17.00	17.00	27.00	15.00	12.00							16.33	5.92	.00	-27.00	27.00
	104	DIAGONAL EINF.	SS		1.00	1.00	.00	1.00	.00	1.00							.66	.52			
	105	DIAGONAL DUPL.	FS		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00							1.00	.00			
	106	EINZELB.DIAG.F	SS		1.00												1.00	.00			
	107	EINZELB.DIAG.E	FS		2.00												2.00	.00			
	108	WELIG			1.00												1.00	.00			
	110	MICROWELIG			2.00												2.00	.00			
	170	ANZAHL STAUF			.00												.00	.00			
	185	KRUEHM.SCH.EIN	FS		-27.00	-20.00											-23.50	4.95	.00	-27.00	27.00
	186	KRUEHM.RL.EIN	FS				-12.00	-15.00	-22.00	-17.00							-16.50	4.20	.00	-15.00	15.00
	187	KRUEHM.SCH.DUP	SS		27.00	27.00	27.00	22.00	20.00	27.00							25.00	3.16	.00	-27.00	27.00
	189	DIAGONAL EINF.	FS		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00							1.00	.00			
	190	DIAGONAL DUPL.	SS		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00							1.00	.00			
	191	EINZELB.DIAG.	FS		2.00												2.00	.00			
	192	EINZELB.DIAG.	SS		2.00												2.00	.00			

Abb. 34: Qualitätsprotokoll für die Kopiertests. Zu sehen ist, dass in Bahn 5 und 6 Krümmungswerte auftreten, die außerhalb der Toleranz liegen.

## 5.2. Wirtschaftliche Bedeutung

Für den Nachweis der wirtschaftlichen Bedeutung wurden einen Monat lang (26.08.2007 bis 26.09.2007) die von der Papiermaschine 5 kommenden Papiertamboure auf ihre Qualität im Bereich Wölbung bzw. Curl getestet und die Daten gesammelt.

- 2408 Bruttotonnen Papier wurden untersucht
- 2072 Bruttotonnen Papier zeigten unzufriedenstellende Curlwerte
- 1470 Bruttotonnen Papier wurden nachbearbeitet
- 574 Bruttotonnen Papier mussten umgewidmet werden
- 28 Bruttotonnen Papier mussten rezykliert werden

Demnach mussten in diesem Monat 602 t Papier erneut hergestellt werden. Wird dieser Ausschuss nun auch nur um 10% reduziert, dann bedeutet dies eine potentielle Einsparung von 722 t Ausschuss im Jahr. Eine Hochrechnung auf die drei Papiermaschinen am österreichischen Standort, an denen das System einsetzbar ist<sup>1</sup>, ergibt eine potentielle Einsparung von 1.480 t Ausschuss pro Jahr.

<sup>1</sup> Die PM 6 besitzt einen Doppelsiebstoffauflauf, weshalb die Faserstoffsuspension nicht sichtbar und daher auch der Messung nicht zugänglich ist.

Parallel dazu sind auch Energie und die entsprechende CO<sub>2</sub>-Emission für die Produktion dieser 602 t Papier aufzuwenden. Tab. 3 gibt eine Übersicht über die Daten. Die Kosteneinsparung ergibt sich nicht nur aus der Energieeinsparung, sondern auch aus dem verminderten Einsatz von Prozesschemikalien und Hilfsstoffen sowie aus dem geringeren personellen Aufwand.

<b>Spezifischer Verbrauch pro Tonne Papier</b>	
CO <sub>2</sub> -Emission [kg/t]	589
E <sub>thermisch</sub> [GJ/t]	10,1
E <sub>elektrisch</sub> [GJ/t]	2,48

<b>Produktionsmenge</b>		
	<b>PM 5</b>	<b>PM 3, 4, 5</b>
Nettoverkaufsmenge [t/a]	101.500	208.000

<b>Potentielle Einsparungen durch die Eule</b>		
	<b>PM 5</b>	<b>PM 3, 4, 5</b>
Ausschuss [t/a]	722	1.480
E <sub>thermisch</sub> [GJ/a]	7.296	14.952
E <sub>elektrisch</sub> [GJ/a]	1.792	3.671
E <sub>gesamt</sub> [GJ/a]	9.088	18.623
CO <sub>2</sub> -Emission [t/a]	425	872
Kosten [€/a]	199.599	409.031

**Tab. 3: Übersicht über die potentiellen Einsparungen durch Einsatz des OWL-Messsystems am österreichischen Standort**

Für den österreichischen Standort kann man demnach mit einer jährlichen Ersparnis von

- etwa **18.600 GJ** (5.100 MWh) an Energie,
- rund **870 t** an CO<sub>2</sub>-Emissionen, und
- etwa **€410.000** an Kosten

rechnen.

Daraus leiten wir schlussfolgernd ab, dass das ursprüngliche Ziel unseres Projektes vollinhaltlich erreicht worden ist.

### 5.3. Ausblick

Zu den Ergebnissen dieses Projektes zählen wir den erfolgreichen Aufbau eines Systems von der Qualitätssicherung bis zur Blattbildungszone an der Papiermaschine mit der Verlinkung über ein selbstentwickeltes Software Tool.

Der MoMiLa (Mobile Micro Laser Based Curl Scanner) ist der Prototyp eines verbesserten Qualitätsprüfgeräts, dessen Vorgänger der ebenfalls von uns entwickelte LaBaCuS (Laser Based Curl Sscanner) ist. Während das Vorgängermodell für die Qualitätssicherung entwickelt worden war, um Papierwölbungen exakt und mit höchster Genauigkeit auch reproduzierbar zu messen, war das Nachfolgemodell im Rahmen dieses Projektes gezielt für die Forschung und Entwicklung gebaut worden. Der Vorteil gegenüber dem Vorgängermodell ist

eine wesentlich höhere Anzahl und Auflösung bei den gemessenen Punkten, die uns nun in die Lage versetzt, auch mehrdimensionale Wölbungen zu erfassen, wie zum Beispiel ein gewelltes Probenblatt oder einen sogenannten S – Curl. Weiters ist es nun möglich auch Proben zu messen, die nicht exakt einem A4 Format entsprechen.

Das von uns entwickelte OWL – System (Online Wire Section Look out) liefert uns nun Echtzeitbilder von den Strömungsverhältnissen in der Blattbildungszone und somit sofortige Informationen über Schwankungen oder Änderungen in den dort vorherrschenden Strömungsbildern, die ihrerseits Einfluss auf die Hauptorientierungsrichtungen der Fasern im Gefüge und damit auf die gerichteten Spannungslinien im Papierblatt haben. Bisherige Tests an produzierenden Papiermaschinen brachten Ergebnisse, die sowohl von der Qualitätssicherung als auch der Produktion mit großer Anerkennung bedacht wurden.

Die Entwicklung der „Tension Toy“ Software gibt uns ein Hilfsmittel, bei dem wir an einem virtuellen Papierblatt durch Eingabe der Spannungskräfte und -felder ein Verformungsbild des Blattes berechnen lassen können. Diese Software soll in erster Linie der Verifizierung von Beobachtungen und Korrelationsannahmen dienen.

Mit dem Abschluss dieses Projektes sehen wir einen wesentlichen Schritt erledigt auf dem Weg zur denkenden Papiermaschine.

Das Messgerät wurde bereits zum Patent angemeldet (s. Kapitel 7.5 „Patentierungsantrag“). Seit dem Abschluss des Projektes fanden Gespräche mit der Helsinki University of Technology (TKK) und mit der Technischen Universität Graz statt, um das entwickelte System auch wissenschaftlich in Form einer Doktorarbeit nutzen zu können. Mondi Business Paper plant daher nationale und internationale Forschungseinrichtungen mit Ihrer Erfindung zu unterstützen.

Zur Zeit der Fertigstellung dieses Berichtes (Juli 2008) wird in Zusammenarbeit mit der TU Graz eine Diplomarbeit durchgeführt, deren Ziel es ist, den Zusammenhang zwischen den mit dem OWL-Messsystem ermittelten Strömungen auf dem Sieb, den Curl-Werten und Faserorientierungsmessungen eingehender zu untersuchen.

## **6. Angaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie**

Dieses Projekt hatte sich zum Ziel gesetzt, ein innovatives Mess- oder Produktionsdienstleistungssystem zu entwickeln, das durch seinen sofortigen Einsatz in der Praxis eine hohe Umsetzungsorientiertheit beweist. Ausgehend von intern und extern durchgeführten Grundlagenstudien und der Entwicklung unseres Verformungsmessgerätes im vorhergehenden Projekt haben wir den nächsten Schritt in der Entwicklungskette hin zum anwendbaren System gemacht.

Die Forderung der österreichischen und internationalen Papierindustrie nach einem Messsystem, welches thermische oder mechanische Spannungen nachweisen kann wird seit ein paar Jahren zunehmend lauter. Als innovatives Unternehmen hat es sich Neusiedler und Mondi Business Paper zu einem Anliegen gemacht, solche Probleme aktiv anzupacken, Lösungen zu präsentieren und daraus Wettbewerbsvorteile zu ziehen.

Entsprechend der in Kapitel 2 dargestellten Projektziele und der in Kapitel 4 dargestellten Arbeitsschwerpunkte wurde ein Mess- und Regelverfahren entwickelt, das bei der Qualitätssicherung in der Papierproduktion erstmals eine vorbeugende Strategie ermöglicht, anstelle bisheriger reaktiver Strategien. Folglich wird die Produktion von Ausschuss vermieden, was den Energieeinsatz signifikant reduziert und somit die Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses stärkt. Diese vorbeugende Strategie wurde für die Einhaltung des wichtigen Qualitätsparameters „Verformung“ entwickelt.

Die Hauptleitlinien dieses Projektes, die nicht nur in die Richtung der verbesserten Wettbewerbsfähigkeit vor allem der österreichischen Standorte, sondern auch der nachhaltigen und Ressourcen schonenderen Nutzung unseres nachwachsenden Rohstoffes Holz, sowie der Senkung der zur Produktion notwendigen Energie und der CO<sub>2</sub>-Emission gehen, waren unseres Erachtens ideal für die 4. Programmlinie der Fabrik der Zukunft.

Die Zielsetzung des Projektes stimmt mit der Themenstellung 5.2 der 4. Ausschreibung der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ überein: Technologien und Innovationen bei Produktionsprozessen, deutliche Reduktion des Ressourceneinsatzes im Hinblick auf Verbesserungen im Gesamtsystem. Ein signifikanter Fortschritt in Richtung Nachhaltigkeit ergibt sich daraus auf natürliche Weise.

Eine Besonderheit dieses Projekts war die natürliche Integration mehrerer Projektarten, nämlich „wirtschaftsbezogener Grundlagenforschung - WGF“, „Produkt- und Komponenten-Entwicklung - TKE“ und „Demonstration“, wobei der Schwerpunkt entsprechend der Teilziele auf „wirtschaftsbezogene Grundlagenforschung“ lag. Die Verbindung zu Demonstrationsprojekten ergibt sich daraus, dass der F&E Zyklus industrielle Maschinen zur Papierproduktion einbezogen hat. Dadurch sind die Ergebnisse direkt in der Produktion anwendbar bzw. auf andere industrielle Papier- und Kartonmaschinen übertragbar. Verbunden mit Mondis Bereitschaft, diese Ergebnisse zu veröffentlichen und vorzuzeigen, realisiert dieses Projekt in der Tat in einen „Leuchtturm der Innovation“. Allein erste Reaktionen innerhalb von Mondi Österreich haben gezeigt, wie sehr dieses Messverfahren bei jedem Papiertechnologen hochgeschätzt wird. Es ist, als würde man eine lang ersehnte, neue Dimensionen der Wahrnehmung eröffnen. Die Präzision und Echtzeitdynamik ist dabei derart hoch, dass korrigierende Eingriffe relativ schnell und direkt gefunden werden.

Gleichzeitig betrachten wir aber unsere Entwicklungskette mit dem erfolgreichen Abschluss noch nicht als beendet, sondern nur als weiteren Schritt hin zu dem von uns visionierten Ziel einer „denkenden Papiermaschine“. Die unzähligen Parameter und Steuerorgane machen eine moderne Papiermaschine zu einer der komplexesten technischen Entwicklungen unserer Zeit. Bisher ist eine Implementierung von künstlicher Intelligenz und hochentwickelten Messsystemen aber nur begrenzt durchgeführt worden. Ein solches Projekt wurde bisher nur vereinzelt und zögerlich in Angriff genommen, und es zeigt sich eine deutliche Notwendigkeit, die teilweise weltweit verstreuten Aktivitäten zu koordinieren. Ein wichtiger Entwicklungsschritt ist mit Hilfe unseres Projektes getan worden.

## 7. Anhang

### 7.1. Literaturverzeichnis

- [1] Bos J. H., Veenstra P., Verhoeven H., de Vos, P. D.: Das Papierbuch – Handbuch der Papiererzeugung. EPN Verlag, Houten 1999.
- [2] Hering E., Martin R., Stohrer M.: Physik für Ingenieure (4. Auflage). VDI, Düsseldorf 1992.
- [3] Holik H. (Hrsg.): Handbook of Paper and Board. Wiley-VCH, Weinheim 2006.
- [4] <http://www.uni-duisburg.de/FB7/FG02/Mathcad/felu.jpg> (Abgerufen am 25.6.2008 13:32)
- [5] Sixta H. (Hrsg.): Handbook of Pulp, Volume 1. Wiley-VCH, Weinheim 2006.
- [6] Sixta H. (Hrsg.): Handbook of Pulp, Volume 2. Wiley-VCH, Weinheim 2006.
- [7] Vereinigung der Arbeitgeberverbände der Deutschen Papierindustrie e.V. (Hrsg.): Papiermacher Taschenbuch (8. Auflage). Dr. Curt Haefner-Verlag, Heidelberg 1999.
- [8] Niskanen K. (Hrsg.): Papermaking Science and Technology Book 16 – Paper Physics (CD-Rom Version 11.01). Fapet Oy, Helsinki 1998.
- [9] Lindblad G., Fürst T.: The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board. Lorientzen & Wettre, Kista 2001.

### 7.2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Eulenlogo des OWL-Messsystems. ....	9
Abb. 2: Mollier-Diagramm für feuchte Luft [4]. ....	16
Abb. 3: Bisherige (manuelle) Messung der Papierkrümmung. ....	19
Abb. 4: Parameterdreieck der Blattbildung. ....	21
Abb. 5: Laserabtastung der Probenoberfläche durch den LaBaCuS. ....	24
Abb. 6: Der MoMiLa als präzisere Variante des LaBaCuS ....	25
Abb. 7: Die „Tension-Toy“ Software mit der projizierenden Form des Blattes und den lokalen Spannungsreglern. ....	27
Abb. 8: Mind Map des Projektes Papierspannungsmessung („Paper Tension Online (PTO) oder später als „Project Comet Storm“ bezeichnet). ....	28
Abb. 9: Aufnahme der PM 3, bei der die unter dem Sieb quer zur Bahn liegenden Entwässerungsleisten erkennbar sind. ....	31
Abb. 10: Aufnahme des nach unten abströmenden Wassers unter dem Sieb der PM 3. ....	31
Abb. 11: Aufnahme eines Foils der PM 5 mit durch Brechung optisch versetzter Kante. ....	32
Abb. 12: Auftrefflinie des Suspensionsstrahles auf dem Sieb auf die Vorderkante des Brusttisches. ....	32
Abb. 13: Skizze über die beiden Messbereiche am Sieb M1 und M2. ....	33
Abb. 14: Skizze über den geplanten Aufbau der Sensoren an der PM 5. ....	34

Abb. 15: Skizze über den geplanten Aufbau der Sensorenhalterung an der PM 5.....	34
Abb. 16: Praktischer Einsatz der Sensoren im Versuch an der PM 5. ....	35
Abb. 17: Stimmungsvolle Illustration des Messprinzips der Eule. An den Wellenkämmen entstehen Reflexionen. Die Bewegung der Wellen lässt sich aus der Bewegung der Reflexionspunkte ermitteln. ....	37
Abb. 18: Analogie der Suspensionsoberfläche mit einer reflektierenden Christbaumkugel...	38
Abb. 19: Zusammenhang zwischen der Krümmung der spiegelnden Oberfläche und der Verkürzung des scheinbar zurückgelegten Weges. ....	38
Abb. 20: Ermittlung der Korrelation zwischen zwei zeitversetzt aufgenommenen Bildern. ....	40
Abb. 21: Etwa 10% der Werte im äußeren Bereich des Messfeldes werden verworfen. ....	41
Abb. 22: Rohvektoren.....	42
Abb. 23: Rohvektoren nach Medianbefilterung. ....	42
Abb. 24: Aufnahme nach Anwendung eines Glättungsfilters, um die stark beleuchteten Bereiche zu ermitteln. In diesen Bereichen sollen die Vektoren weniger stark gewichtet werden.....	43
Abb. 25: Die Vektoren werden entsprechend der Belichtung gewichtet. Größere Kreise entsprechen einem geringeren Gewicht.....	43
Abb. 26: Das aus den gewichteten Rohvektoren gebildete Spline-Vektorfeld. Dieses erlaubt einem menschlichen Beobachter bessere Vergleiche von einem Bild zum nächsten. Die Strömung rechts oben ist ein Artefakt und entsteht durch Reflexionen an Maschinenteilen. Dies ließe sich durch Definition einer Region of Interest verhindern. Die hinter das Spline-Vektorfeld gelegte Aufnahme ist nicht die, die zur Ermittlung der Strömung herangezogen wurde, sondern wurde mit wesentlich längerer Belichtungszeit aufgenommen und dient in der Praxis zur Orientierung an der Papiermaschine. ....	44
Abb. 27: Der Messkopf des OWL-Messsystems, mit dem Vor-Ort-Bildschirm und den beiden Objektiven, die dem System den Namen (OWL = deutsch „Eule“) gegeben haben. Links und rechts zwei herkömmliche Bauleuchten, die als Lichtquelle dienen und auf der gegenüberliegenden Seite des Siebes aufgestellt werden. ....	45
Abb. 28: Messkopf und Computer des OWL-Messsystems im Transportkoffer verstaut. ....	45
Abb. 29: Das gesamte OWL-Messsystem inklusive Bauleuchten und Stativen kann in zwei Transportkoffern verstaut werden. ....	46
Abb. 30: Ausdruck aus dem Prozessleitsystem, der die wichtigsten Prozessparameter im konstanten Teil (= Stoffzuführung zur Papiermaschine) angibt. Rechts oben der Stoffauflauf. ....	47
Abb. 31: Detailsausdruck aus dem Prozessleitsystem, der die Daten des Stoffauflaufes angibt.....	47
Abb. 32: Vom Qualitätsleitsystem vor der Aufwicklung gemessene Profile über die Breite der Papierbahn. V. o. n. u.: Flächengewicht, Feuchte, Dicke.....	48
Abb. 33: Mit dem OWL-System ermittelte Strömungen auf dem Sieb. Links das Vektorbild mit mittlerer Strömung (grüne Linie) und Hot Spot (blauer Kreis). Rechts das Störungsbild, wobei dunkelblaue Bereiche die mittlere Strömung repräsentieren und andere Farben Abweichungen davon darstellen. ....	48
Abb. 34: Qualitätsprotokoll für die Kopiertests. Zu sehen ist, dass in Bahn 5 und 6 Krümmungswerte auftreten, die außerhalb der Toleranz liegen. ....	49
Abb. 35: Baumer Sensoren OADM2016460/S14F.....	55
Abb. 36: Micro-Epsilon Sensoren LD 1607-20. ....	55
Abb. 37: Lasercomponents LC-ML-AT-200/100/10K. ....	56

### 7.3. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Absolute Gleichgewichtsfeuchte verschiedener Papiere bei 23°C [3]. ....	15
---	----

Tab. 2: Übersicht über die Lösungsansätze zur Früherkennung von Papierverformungen...30  
 Tab. 3: Übersicht über die potentiellen Einsparungen durch Einsatz des OWL-Messsystems am österreichischen Standort.....50

## 7.4. Die Sensoren

Messbereich 80mm +/- 50mm  
 Ausgang 0V...+10V  
 Versorgung DC 12...28  
 Kabel 2m

Foto

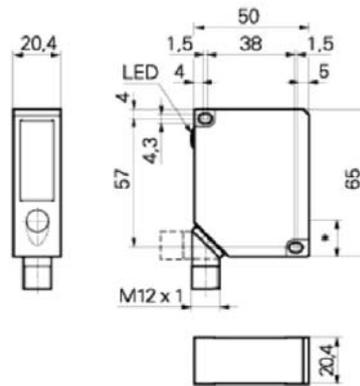


Abb. 35: Baumer Sensoren OADM2016460/S14F.

Messbereich 65mm +/- 20mm  
 Ausgang -10V...+10V  
 Versorgung DC 10...30  
 Kabellänge 2m

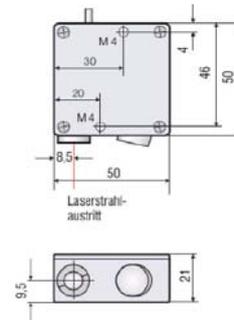
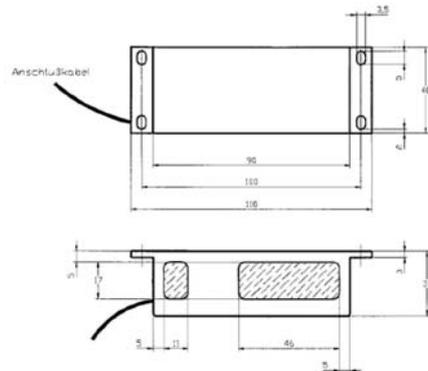


Abb. 36: Micro-Epsilon Sensoren LD 1607-20.

Messbereich 50mm +/- 5mm  
Ausgang 0...10V  
Versorgung DC 18...35  
Kabellänge zur Auswertung 1m  
Kabel der Auswertung 2m

Sensorkopf für LC-ML-AT-100/20/1K  
und LC-ML-AT-200/100/1K



**Abb. 37: Lasercomponents LC-ML-AT-200/100/10K.**

Die Lasercomponents LC-ML-AT-200/100/10K Sensoren wurden wegen zu großen Messrauschens von 1mm und einer sich daraus ergebenden zu hohen Ungenauigkeit nicht in Betracht gezogen.

## 7.5. Patentierungsantrag

**MIKŠOVSKÝ & POLLHAMMER OEG**  
 PATENTANWÄLTE  
 European Patent and Trademark Attorneys

Mondi Business Paper Services AG  
 z.Hd. Herrn Dipl.-Ing. W. Altenstrasser  
 Haidmühlstraße 2-4  
 3363 Ulmerfeld-Hausmehring

per Telefax (07475/500-74-5142)

Dipl.-Ing. DR. ALEXANDER MIKŠOVSKÝ  
 Dipl.-Ing. Dr. GERDA CUNOW

Währinger Straße 3, Postfach (POB) 146  
 1096 Wien, Austria

Tel -43 (1) 408 47 34  
 Fax -43 (1) 408 47 34-9  
 Mail patmpol@patent-austria.com  
 www.patent-austria.com

Wien, 28.09.2007

Unser Zeichen/Our ref.: P03843

Ihr Zeichen/Your ref.: ---

Betr./re.: **Neue Patentanmeldung in Österreich**  
**Mondi Business Paper Services AG**  
**"Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen einer Strömung sowie Verwendung hierfür"**

Sie erhalten anbei		We enclose		Veuillez trouver ci-joint:
zur Kenntnisnahme		for your information		pour information
zur Stellungnahme		for your comment		pour prise de position
zur Erledigung		for processing		pour exécution
Bitte um Bericht		please report		prère de nous rapporter
mit der Bitte		please contact us		prère de nous
um Anruf		by phone		téléphoner

\* Bemerkungen | remarks | remarques:

Gemäß Ihrem geschätzten Auftrag haben wir heute, 28. September 2007, die obengenannte Anmeldung eingereicht. Den detaillierten Anmeldebericht werden wir Ihnen nach Erhalt des amtlichen Aktenzeichens übermitteln.

Mit vorzüglicher Hochachtung | Very truly yours | Vos dévoués

Patentanwälte  
 Mikšovsky & Pollhammer OEG

Mündliche Mitteilungen sind unverbindlich!  
 BA CA AG 0142-35501/00, RLB NOE AG | 2.080.560, PSK AG | 2.023.978  
 Firmenbuchnr. FN 36955x, HG Wien; DVR: 0817015; VAT-Nr. ATU 13376904

## 7.6. Projektlogo

Center of Competence for Innovation



**mondi**  
business paper



Pushing the limits **INNOVATION**



Forschungsinstitut für technische Physik  
Entwicklung • Simulation • Optimierung

**WIR BRINGEN DEN DURCHBLICK**

Dipl.-Ing. Dr. Gottfried Schaffar