

# **Echtzeitformationsmessung an Papierbahnen mit einem Optischen Fourierprozessor**

## **Online Formation Measurement for Paper Web Using Optical Fourier Processor**

**K. Janschek, V. Tchernykh, S. Dyblenko, S. Reimann**, Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden,  
**G. Keller**, PTS – Papiertechnische Stiftung Heidenau

### **Kurzfassung**

Mit den zunehmenden Qualitätsanforderungen an viele Papiersorten steigt die Notwendigkeit, verschiedene optische und strukturelle Papiereigenschaften bereits in der Maschine umfassend zu beurteilen und wenn nötig online zu korrigieren. Das Institut für Automatisierungstechnik der TU Dresden entwickelt zur Zeit zusammen mit der PTS Heidenau im Rahmen eines von AiF geförderten Projektes eine neuartige Sensortechnologie, mit der die Rechenzeit der automatisierten visuellen Beurteilung der Gleichmäßigkeit oder spezieller Strukturen des Papiers, deutlich verkürzt werden kann. Das Sensorsystem ist in der Lage, einen wesentlichen Teil der Bildauswertung, nämlich die Zerlegung in ein zweidimensionales Fourierspektrum, rein optisch und damit sehr schnell auszuführen. In dem vorliegenden Beitrag werden Schlüsselaspekte des neuartigen Sensorkonzepts, angestrebte technische Leistungen sowie erste Testergebnisse vorgestellt.

### **1. Einleitung**

Die steigenden Qualitätsanforderungen an viele Papiersorten erfordern die umfassende Beurteilung und Korrektur verschiedener optischer und struktureller Papiereigenschaften bereits während des Herstellungsprozesses. Vor allem Eigenschaften, wie die Formation, die Gleichmäßigkeit von Oberflächen sowie die gewünschte Strukturbeschaffenheit treten dadurch zunehmend in den Blickpunkt. Diese Qualitätsmerkmale waren auf Grund der technischen Möglichkeiten bis dato nur begrenzt online messbar. Hierfür werden heute vor allem Lasersensoren benutzt, die das Transmissionsprofil des Papiers auf einer Linie messen und daraus verschiedene Formations- oder Güteparameter ermitteln [1, 2]. Verbreitet sind ferner Messgeräte zur offline-Kontrolle, die vor allem auf der Basis von

Lichtpunkttransmissionsmessungen oder  $\beta$ -Strahlern Linien abtasten. Neuerdings kommen zur Flächeninspektion im Labor auch Kamerasysteme zum Einsatz [2, 3].

Durch die Fortschritte im Bereich der Bildsensorik und Bildauswertung gibt es jetzt erste Ansätze, flächenhafte Qualitätsbeurteilungen an der laufenden Papierbahn auf der Basis schneller Kameratechnologie durchzuführen. Dabei werden die aufgenommen Bilder gespeichert und anschließend softwaretechnisch auf digitalen Recheneinheiten ausgewertet. Auf Grund der hohen Datenmengen erfordert dies einen hohen rechentechnischen Aufwand (digitale Hochleistungsprozessoren, Parallelstrukturen). Hinsichtlich der hohen Bahngeschwindigkeiten von 600...2000 m/min ist mit gängigen digitalen Systemen aus Rechenzeitgründen eine lückenlose Inspektion nur mit sehr großem Hardwareaufwand möglich [4, 5].

## **2. Innovative optische Fouriersensorik**

Das Institut für Automatisierungstechnik der TU Dresden beschäftigt sich seit längerem mit optischer Bildverarbeitung auf der Basis eingebetteter optischer Rechner. Der bisher zur Erdbeobachtung mit Satelliten entwickelte und eingesetzte eingebettete optische Fourierprozessor ist in der Lage, einen wesentlichen Teil der Bildauswertung, nämlich die Zerlegung in 2D-Spektren optisch und damit in Lichtgeschwindigkeit auszuführen [4]. Damit kann man die Bildauswertung bis zu einem Faktor 200 gegenüber digitalen Hochleistungsprozessoren beschleunigen. So lässt sich ein wesentlich größerer Teil der Papierbahn vollständig überwachen. Höhere Messraten ermöglichen zusätzlich eine effektive Bearbeitung von Zwischenmesswerten und verbessern die Robustheit der Messverfahren gegenüber Störungen (und somit die Sensorempfindlichkeit).

Im Rahmen eines von AiF geförderten Projektes (AiF 59 ZBR) wird zur Zeit am Institut für Automatisierungstechnik der TU Dresden in Zusammenarbeit mit der PTS Heidenau diese neuartige Fouriersensortechnologie für die online-Formationsmessung in der Papierproduktion entwickelt.

Bei der online-Messung werden Durchlichtbilder der bewegten Papierbahn mit einer schnellen Digitalkamera aufgenommen (siehe Bild 1).

Ein optischer Fourierprozessor (OFP) berechnet daraus die Fourierleistungsspektren bzw. die Leistungsanteile in ausgewählten Spektralbereichen.

Speziell auf die Papierformationsbewertung zugeschnittene Auswerteverfahren ermitteln anhand dieser spektralen Merkmale die Formationsindizes in Echtzeit. Die Auswertung der optisch erzeugten Spektren benötigt vergleichsweise wenig Rechenkapazität und kann mit einer einfachen digitalen Recheneinheit realisiert werden. Zwei Recheneinheiten, eine

optische und eine digitale, bilden damit die Basiskomponenten des hybriden optoelektronischen 2D-Spektralsensors.

Der OFP ist das Kernelement des Sensors und übernimmt die Aufgabe der 2D-Fouriertransformation. Eine Kameraschnittstelle tauscht Bilddaten mit einer externen Bildaufnahme Gruppe aus und führt die Konvertierung durch. Zusätzliche Elektronikkomponenten werden für die Formationsbewertung (Spektrenauswertung) und die Datenübertragung zum Prozessleitsystem benötigt. Das modulare Design ermöglicht eine flexible Anpassung des Sensors an verschiedenste Einsatzbedingungen sowie eine einfache Integration in vorhandene bildverarbeitende Systeme.

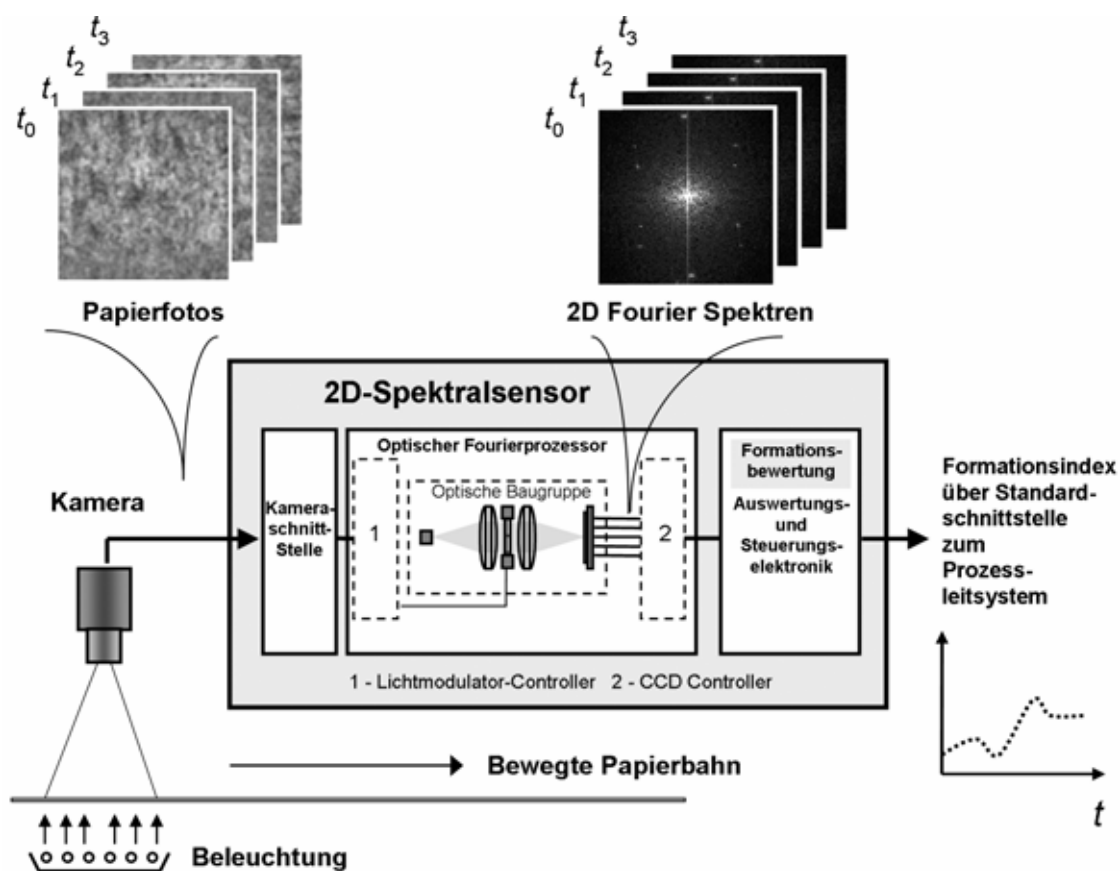


Bild 1: Optische Fouieranalyse für online-Formationsmessung an der Papierbahn

### 3. Kompakter optischer Fourierprozessor

Die Fortschritte im Bereich von Bildsensor- und Mikrodisplayelektronik ermöglichen heutzutage einen kompakten Aufbau optischer Fourierprozessoren sowie eine hohe Spektrenrate (aktuell ca. 200 Spektren/s mit Standardkomponenten). Ein OFP mit kommerziellen Standardkomponenten liefert eine um den Faktor 50 höhere Rechenleistung im Vergleich zu modernen digitalen Fourierprozessoren. Bild 2 zeigt die am Institut für

Automatisierungstechnik entwickelte OFP-Baugruppe und Tabelle 1 die technischen Daten. Bildgröße, Spektrengöße und Spektrenrate des Sensors werden durch die optoelektronischen Komponenten (Lichtmodulator und CCD-Sensor) begrenzt. Die optoelektrischen Charakteristiken des verwendeten CCD-Sensors bestimmen zudem die niedrigste messbare Frequenz im Spektrum. Eine speziell entwickelte Elektronik extrahiert aus beliebigen Bereichen der Spektren eine Anzahl von spektralen Merkmalen (<256) entsprechender räumlicher Frequenz.

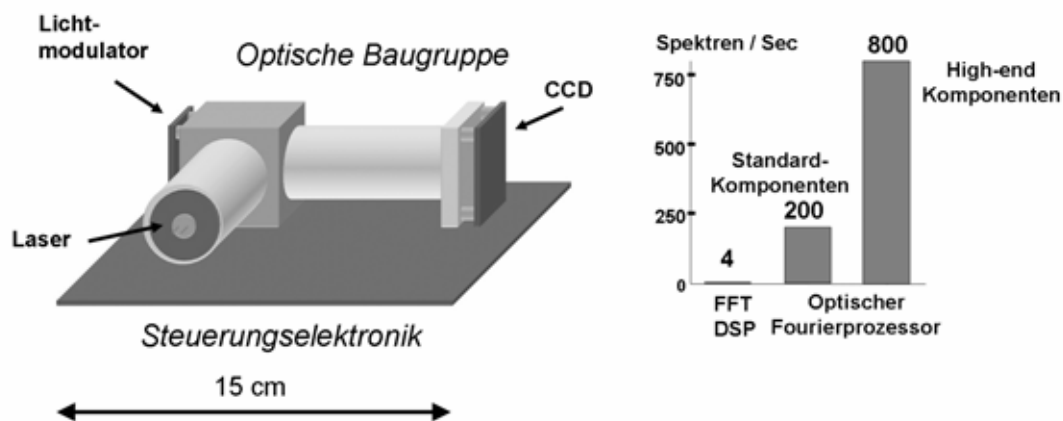


Bild 2: Kompakter leistungsfähiger optischer Fourierprozessor

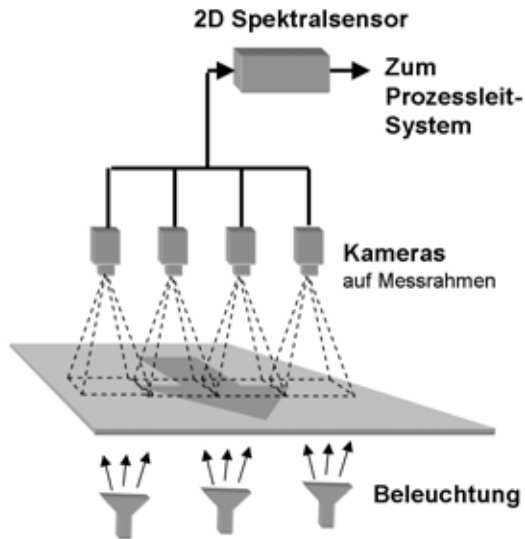
Tabelle 1: Technische Daten des optischen Fourierprozessors

Abmessungen, (HxBxT)	35 x 150 x 120 mm
Bildgröße	832 x 632 Pixels
Bildrate	200 Spektren/Sek
Räumlicher Frequenzbereich	$1/48 \text{ pixel}^{-1}$ bis $1/2.6 \text{ pixel}^{-1}$
Spektrenauflösung	12 bit
Spektrale Merkmale	bis 256

#### 4. Formationsmesssystem

Für eine lückenlose Papierbahninspektion wird eine Multikameraarchitektur vorgeschlagen (siehe Bild 3). Ein 2D-Spektralsensor mit acht industriellen Standardkameras ermöglicht die Überwachung von 22 Quadratmeter pro Sekunde. Für schnelle Papierbahnen (mit Bahngeschwindigkeiten bis zu 50 m/s) kann eine kompakte Baugruppe aus einem 2D-Spektralsensor und einer schnellen Kamera einen Streifen der Papierbahn lückenlos inspizieren.

Die Kameras werden zusammen mit dem Sensor auf einem Rahmen montiert. Nach Bedarf können zusätzliche Sensoren und Kameras hinzugefügt werden und über dieselbe Schnittstelle an das Prozessleitsystem angeschlossen werden (einfache Skalierbarkeit).



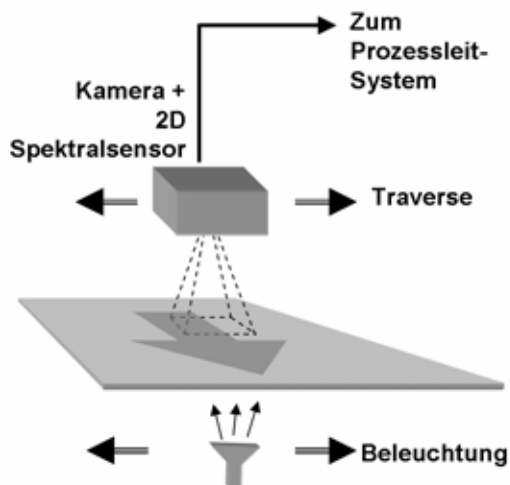
### Technische Daten

(1 Spektralsensor, Papierauflösung 0.5 mm)

Lückenlose Inspektion	bis 22 m <sup>2</sup> /s
Papiergeschwindigkeit (mit einer schnellen Kamera)	bis 50 m/s
Bildfläche einer Kamera	bis 38 x 29 cm
Räumlicher	0.042 mm <sup>-1</sup> ( 1/24 mm)
Frequenzbereich	0.769 mm <sup>-1</sup> ( 1/1.3 mm)

Bild 3: Multikameraarchitektur für lückenlose Inspektion

Auf manchen Papiermaschinen verwendet man heute Traversenplattformen mit mehreren Sensoren. Ein Spektralsensor mit einer schnellen Kamera bildet ein Formationssensor (Bild 4), der aufgrund seiner kompakten Bauform und einheitlichen Schnittstellen leicht auf einer solchen Traversenplattform integriert werden kann. Darin sind alle Komponenten außer der Papierbahnbeleuchtung in einem Gehäuse untergebracht.



### Technische Daten

( Papierauflösung 0.15 mm )

Messrate	200 pro Sekunde
Bildfläche einer Kamera (vom Gehäuse abhängig)	bis 13 x 10 cm
Räumlicher	0.143 mm <sup>-1</sup> ( 1/ 7 mm)
Frequenzbereich	2.500 mm <sup>-1</sup> ( 1/ 0.4 mm)
Abmessungen eines Moduls	25 x 25 x 15 cm

Bild 4: Einzelkameraarchitektur für Traverseninspektion

## 5. Spektrenauswertung

Für Papierexperten ist die Formation ein Maß für die Größe sowie den Hell-Dunkel-Kontrast der Flocken (=Faseransammlungen) in der Papierstruktur. Die Zerlegung von Papierbildern mit der 2D-räumlichen Fouriertransformation bildet flächenhafte periodische Eigenschaften (z.B. Flockengröße und -kontrast) in räumlich konzentrierte Bereiche des Fourierspektrums ab. Umgekehrt erzeugen lokal begrenzte Anomalien (z.B. Pinholes, Schwärzungen oder Falten) bei dieser Transformation sehr viele verstreute Anteile im Amplitudenspektrum. Dadurch vereinfacht sich die Auswertung flächenhafter Eigenschaften (z.B. der Papierformation) und lässt sich an verschiedenste Problemstellungen anpassen. In Bild 5 sind drei synthetische Beispielbilder mit ihren zugehörigen Amplitudenspektren dargestellt, in denen ausgewählte Frequenzbänder richtungsunabhängig verstärkt wurden, um die Abbildung verschiedener Flockengrößen (Formationen) im Spektrum zu verdeutlichen.

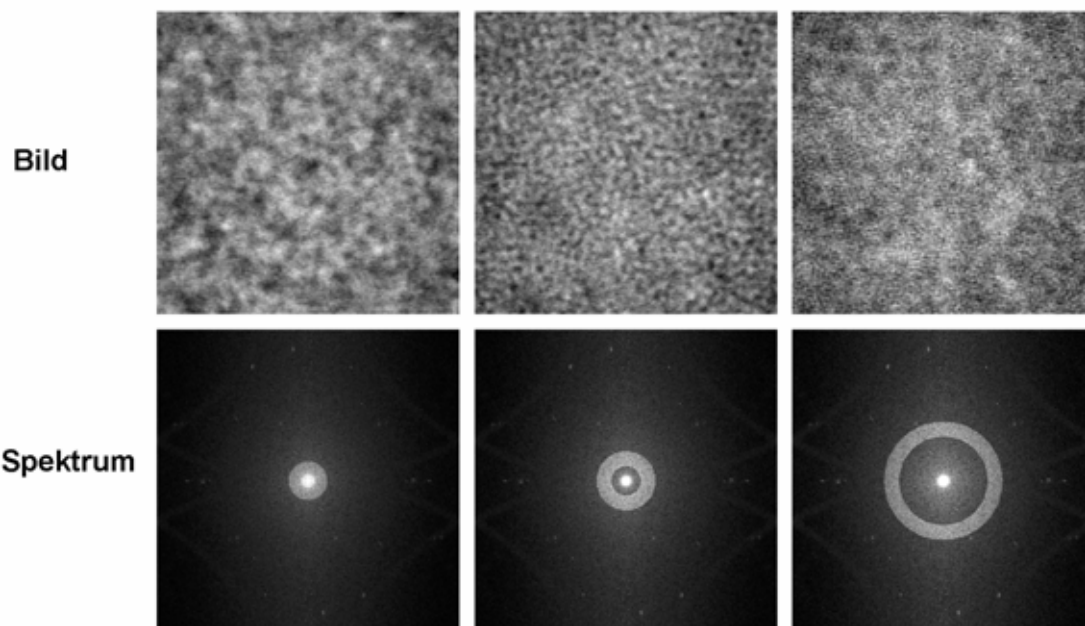


Bild 5: Papier unterschiedlicher Flockengröße, mit Amplitudenspektrum

Mit zunehmender Flockengröße verkleinert sich der Abstand des abgebildeten Ringgebietes (Frequenzband) vom Zentrum des Spektrums, d.h. die Frequenz nimmt ab. Der Hell-Dunkel-Kontrast bestimmt die Amplitude des Frequenzbandes (in Bild 5 nicht zu sehen). In einem realen Papierbild sind Größen und Helligkeiten der Flocken statistisch zufällig verteilt. Ziel der Spektrenauswertung ist es, diese Verteilung zu messen (z.B. durch Summation ringförmiger Spektralbereiche) und ihren Einfluss auf die Formations- bzw.

Qualitätsparameter zu ermitteln. In Abhängigkeit von der Papiersorte, vom Anwendungsbereich und nicht zuletzt vom Hersteller des Papiers können besondere Regeln für die Formationsbewertung gelten. Für viele Papiersorten verschlechtert sich die Formation mit der Zunahme von Flockenkontrast und/ oder -größe. Die relative Formation von Papierproben (im Durchlicht) ist von Experten mit Hilfe eines paarweisen Vergleichs [6] oder mittels eines Rankings (Notensystem) zuverlässig bestimmbar. Diese subjektive Klassifizierung erfordert allerdings einen hohen Bewertungsaufwand und trifft keine absoluten Aussagen.

Zur Ableitung eines mathematischen Bewertungsmodells wurde das Fourierspektrum eines Papierbildes in mehreren Experimenten systematisch verändert. Anschließend wurden daraus durch Rücktransformation synthetische Bilder mit neuen spektralen Merkmalen bzw. Formationseigenschaften erzeugt.

Nach Einordnung der synthetischen Bilder in eine Formationsrangordnung durch Papierexperten konnten folgende Bewertungskriterien für eine gute Formation identifiziert werden:

- kleine Summe der Spektralmerkmale (= geringer Hell-Dunkel-Kontrast im Bild)
- hoher Anteil hochfrequenter Merkmale relativ zu niederfrequenten (zentraler Bereich des Spektrums)

Nach Analyse der spektralen Merkmale dieser synthetischen Bilder und der zugehörigen Expertenbewertungen wurde ein mathematisches Bewertungsmodell abgeleitet. Die Verifikation und Parametrierung des Modells erfolgte mit unterschiedlichen Papiertypen. Bild 6 zeigt die Ergebnisse der Indexberechnungen im Vergleich zum Expertenranking für beide Papiergruppen (1-Kopierpapier, 2-Dekorpapier).

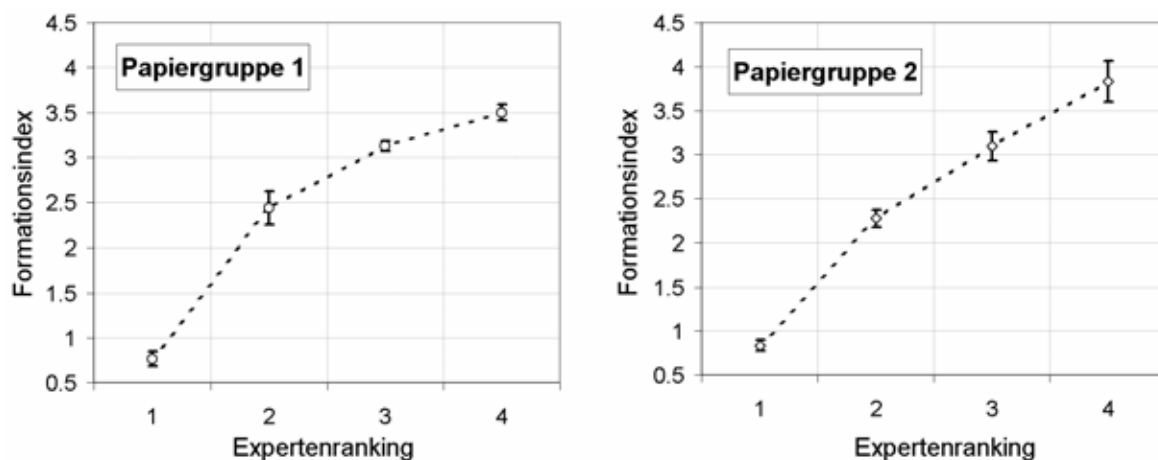


Bild 6: Verifikation des Bewertungsmodells für zwei Papiergruppen

In Bild 6 sind als Fehlerbalken die Standardabweichungen der berechneten Indexwerte für die jeweilige Papiersorte angetragen. Bereits geringfügige Filterung bewirkt die gute Reproduzierbarkeit der Messungen innerhalb der Papiersorten sowie weitgehende Übereinstimmung des berechneten Rankings mit dem der Papierexperten.

## **6. Zusammenfassung**

Schnelle optische Fourierprozessoren bilden die Basis für eine neue Sensorik in der Echtzeitprozessüberwachung.

Die hervorragenden Leistungen dieser Sensorik können die Qualität der online-Überwachung deutlich verbessern. Hohe Messraten erlauben eine lückenlose Inspektion von hergestellten Produkten sowie eine robuste und objektive Erkennung von Produktionsfehlern.

Besondere Eigenschaften der Gerätetechnologie spielen eine wichtige Rolle bei der Integration in industriellen bildverarbeitenden Systemen. Die Entwicklungen am Institut für Automatisierungstechnik zielen deshalb auf optimierte Prozessorstrukturen hinsichtlich Prozessfähigkeit (d.h. Einbettung in industrielle Automatisierungssysteme bzw. Prozessleittechnik), Robustheit, Modularität und Skalierbarkeit sowie anwendungsspezifische Auswerteverfahren. Außer der papiertechnischen Anwendung, wie in diesem Beitrag vorgestellt, bieten sich eine Reihe weiterer Einsatzmöglichkeiten in industriellen Prozessen an.

## **7. Literatur**

- [1] Trojna, G.; Keller, G.: Neue Wege in der Formationsmessung; Das Papier 53 1999: S.611-617.
- [2] Shead, R.: Formation measurement – how it relates to process and final quality; Paper Technology 34 1993.
- [3] Schacanski, J.; Dodson, C.T.J.: Bildanalyse zur Erfassung der Textur der Papieranisotropie und der Schwankungen; Appita Journal 49 1996: S.275-288.
- [4] Goodman J.W.: Introduction to Fourier Optics; McGraw-Hill, New York, 1968.
- [5] Norman, B.: Messmöglichkeiten während der Blattbildung; Multi-Phase flows in papermaking. Conference 2000, Manchester. Leatherhead (Hrsg.): Pira International 2000: S.1-22.
- [6] C. Chareza, T. Greve und L. Göttching, „Einstufung von Probedrucken nach visueller Beurteilung mittels Paarvergleichs-Index“, Das Papier 39 1985: S.293-302