

Qualitätskontrolle von bedruckter, textiler Bahnenware – ausgewählte Lösungsverfahren zur Farbmusterinspektion

C. Lucht, K.-H. Franke
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Informatik und Automatisierung,
Fachgebiet: Graphische Datenverarbeitung
PF 100565, 98694 Ilmenau
E-Mail: carsten.lucht@rz.tu-ilmenau.de
karl-heinz.franke@prakinf.tu-ilmenau.de

1 Einleitung

Die Gewährleistung einer gleichbleibend hohen Produktqualität ist in der Textilindustrie wie in anderen Branchen entscheidend für den dauerhaften Erfolg eines Unternehmens am Markt. Die hierzu notwendige Intensivierung der Qualitätskontrolle kann nur mit verstärktem Einsatz leistungsfähiger, automatisierter Inspektionssysteme erreicht werden.

Im Vergleich zu anderen Branchen muß der Stand der automatischen Fehlerinspektion in der Textilproduktion als unbefriedigend eingeschätzt werden. Nach wie vor stützt sich die Qualitätskontrolle von textiler Bahnenware fast ausschließlich auf die visuelle Begutachtung durch den Menschen. Dies liegt vor allem an den hohen Anforderungen, die aus der Komplexität der Kontrollaufgabe und den gleichzeitig hohen Qualitäts- und Geschwindigkeitsvorgaben erwachsen. Die Inspektion von mehrfarbig bedruckten, komplex gemusterten Textiloberflächen zählt dabei zu den anspruchsvollsten Automatisierungsaufgaben. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bildet sie gleichzeitig eine der vorrangig zu lösenden Problemstellungen der textilen Warenschau.

Dieser Beitrag widmet sich der automatischen Kontrolle von mehrfarbig bedruckter, textiler Bahnenware und präsentiert Ergebnisse aus dem AIF-Forschungsprojekt „Neue Bildverarbeitungstechnologien“ [1]. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen algorithmische Lösungsansätze zur Detektion von Farbmusterfehlern, wobei zwei ausgewählte Verfahren anhand eines Musterbeispiels weiter vertieft werden.

2 Problemstellung

Der Textildruck als eine Möglichkeit für das örtliche ein- oder vielfarbige Bemustern von textilen Flächen hat eine lange Tradition und beinhaltet heute eine Vielzahl von Druckarten, die sich vor allem nach der Art der Musterbildung durch örtliche Anfärbung (z. B. Direktdruck, Reservedruck) und/oder Zerstörung des Farbstoffes (z. B. Ätzdruck) unterscheiden. Bei einigen Textildruckarten (z. B. Ätzdruck, Reaktivdruck) wird das endgültige Erscheinungsbild erst in diversen Nachverarbeitungsschritten erreicht, was die Inspektionsmöglichkeiten an der Druckmaschine stark einschränkt.

In Abhängigkeit von der Druckart und dem zu bedruckenden Material kommen verschiedene Drucktechniken zum Einsatz. Dabei kann prinzipiell nach der Art des Musterauftrages unterschieden werden, also ob das Muster auf den Farbaufträgern erhaben (Reliefdruck) oder vertieft erscheint (Rouleauxdruck) bzw. in einer Schablone ausgespart ist (Filmdruck bzw. Siebdruck). Als maschinelle Umsetzung der Drucktechniken sind vor allem die Rouleaux-, Flachfilm- und Rotationsfilmdruckmaschine sowie der Transferdruckkalender zu nennen. Aufgrund hoher Flexibilität und Leistungsfähigkeit nimmt die Rotationsfilmdruckmaschine eine dominante Position ein.

Der Rotationsfilmdruck stellt eine Variante des Siebdruckes dar, wobei die textile Bahnenware mit walzenförmigen Filmdruckschablonen bedruckt wird (siehe Abbildung 1). Bei den meisten Maschinentypen wird die auf einer Großdocke oder ähnlichem aufgerollte, bereits egalisierte, feuchte Bahnenware (bis zu 165 cm breit) durch ein Walzensystem abgezogen und in gestrafftem und ausgerichtetem Zustand auf das unter den Druckschablonen rotierende Drucktuch geklebt. Die Bahnenware passiert dann die hintereinander auf dem Drucktisch montierten Schablonen (bis 24), wobei mit jeder Schablone genau eine Farbe gedruckt wird. Die Farbe wird seitlich zugeführt und mit einem Rakel im Inneren der Schablone durch siebartige Öffnungen auf die Ware übertragen. Vor Erreichen der Drucktischkante wird die Bahnenware abgelöst, in einem Trockner vorfixiert und abschließend wieder aufgerollt oder gestapelt.



Abb. 1 Rotationsfilmdruckmaschine

Durch den Rotationsfilmdruck entstehen vielfarbige, großflächige, komplexe Muster deren Beschreibung von statistisch bis streng determiniert variiert. Die Musterperiode (Rapport) hängt dabei vom Umfang der Schablonen ab (typisch: 64/82/91,4/101 cm). Die Druckfarbenanzahl erreicht meist nicht die maschinellen Möglichkeiten, durch Überdrucken (z. B. an Musterberandungen) können jedoch zusätzliche Farbnuancen im Druckbild entstehen. Des weiteren lassen sich durch unterschiedliche Perforationsdichten der Schablonen scheinbar fließende Farbübergänge (Dithering) realisieren, wodurch sowohl scharf berandete Muster als auch weiche Musterkonturen entstehen können. Bei Dessins ohne Flächendeckung (z. B. Abb. 3a) kommt die Rohwarenfärbung als weitere Musterfarbe hinzu.

So vielfältig wie die Musterarten fällt auch das Erscheinungsbild der Farbmusterfehler aus. Die Ausprägung der Fehler hängt dabei von zahlreichen Einflußgrößen ab, so daß ohne Nutzung von a-priori-Wissen meist keine umfassende und zugleich abgrenzende Fehlerbeschreibung sowie darüber hinaus eine Zuordnung von Fehlerquellen erfolgen kann. Bei zahlreichen Fehlerarten besteht zudem ein fließender Übergang vom fehlerlosen zum fehlerhaften Muster, wobei die Toleranzschwelle in der Regel vom jeweiligen Verwendungszweck des Stoffes abhängt. Die geringsten Fehlergrößen liegen im Bereich der Fadenperiode (ca. 20-50 Fäden/cm). Zu den Farbmusterfehlern hinzu kommen die Defekte in der Fadenstruktur (Rohwarenfehler), die bei der Qualitätskontrolle ebenfalls erkannt werden müssen, hier jedoch nicht betrachtet werden sollen.

Die Schwierigkeiten bei der Systematisierung der Farbmusterfehler sind möglicherweise ein Grund dafür, daß für die deutsche Textilindustrie keine verbindliche Fehlernormierung existiert. In der Praxis nutzt jeder Textilhersteller einen firmeneigenen Fehlerkatalog, wobei Sortierkriterium und Differenzierungsgrad stark divergieren. Ein brauchbarer Ansatz für eine grobe Systematisierung kann [2] entnommen werden. Darin werden vier grundlegende Druckfehlerarten (Druckrapportverschiebung, unbedruckte Stelle, verwischter Druck, Farbstreifen) unterschieden. Zur Beschreibung von großflächigen Farbabweichungen (Farbtreue) wird der Begriff Farbscheinigkeit definiert. Beispiele für einige der genannten Fehlerarten zeigt Abbildung 3.

Bei Priorisierung der Fehler nach wirtschaftlichen Kriterien sind alle Fehler als wesentlich einzustufen, die sich über relativ große Bahnlängen erstrecken und entsprechend große Warenverluste bewirken. Zu diesen Fehlern zählen generell die Druckrapportverschiebung und die Farbscheinigkeit. Die weiterhin genannten Fehlerarten sind in der Regel lokal begrenzt (z. B. unbedruckte Stelle durch Falte – Abb. 3a), können sich aber auch global

auswirken (z. B. unbedruckte Stelle durch Schablonenfehler). Für die Fehlerinspektion bedeutet dies, daß vorrangig Druckrapportverschiebung, Farbscheinigkeit und weitere, sich periodisch wiederholende Fehler erkannt werden müssen.

Zur Formulierung eines konkreten Anforderungsprofils muß festgestellt werden, daß innerhalb des Druckprozesses zwei prädestinierte Inspektionssorte mit jeweiligen Vor- und Nachteilen existieren. Der erste Inspektionssort befindet sich zwischen der letzten Schablone der Druckmaschine und der Drucktischkante, an der die Druckware vom Drucktuch abgelöst wird (siehe Abbildung 1). Die Online-Fehlerinspektion an dieser Stelle eröffnet die Möglichkeit im Fehlerfall sofort regulierend in den Produktionsprozeß eingreifen zu können. Aus Sicht der Bildverarbeitung ist vor allem die Fixierung (Aufkleben) der Warenbahn auf dem Drucktuch vorteilhaft, da hierdurch Verzugsfreiheit gewährleistet wird und das inspizierte Druckmuster in Rapport und Ausrichtung den Druckschablonen entspricht. Zu den wesentlichen Nachteilen zählen die relativ hohe Druckgeschwindigkeit (bis ca. 55 m/min¹), die verbunden mit Echtzeitforderungen hohe Ansprüche an die einzusetzende Gerätetechnik stellen, sowie die bereits erwähnten Einschränkungen der Inspektion bei einigen Druckarten. Aufgrund der genannten Restriktionen muß über einen weiteren (zweiten) Inspektionssort nachgedacht werden. Sinnvoll wäre eine offline durchgeführte, abschließende Warenendkontrolle. Da hier sämtliche Veredlungsschritte bereits abgeschlossen sind und somit das Druckbild vollständig entwickelt ist, kann ohne Einschränkung durch die gewählte Druckart auf Druckfehler inspiziert werden. Darüber hinaus ist eine gesamtheitliche Detektion von Fehlern möglich. Im Unterschied zur Inspektion an der Druckmaschine kann hier jedoch nicht mehr von identischer Größe und Ausrichtung zu den Druckschablonen bzw. der Mustervorlage ausgegangen werden.

3 Realisierung des Inspektionssystems

Die Besonderheiten der Problemstellung führen zu hohen Anforderungen an alle Hardware-Komponenten des Inspektionssystems, so daß heutige Realisierungen das Potential derzeit verfügbarer Hochleistungsgeräte voll ausschöpfen müssen. Als Bildaufnahmesystem eignen sich Farbzeilenkameras (vorzugsweise mit 3-CCD-Anordnung, ca. 2000 Pixel Zeilenlänge, ≥ 2 kHz Zeilenfrequenz) und leistungsstarke, stabilisierte Linienbeleuchtungen auf der Basis von HQI-Lampen (Halogen-Metaldampflampen, Tageslichttyp), welche den hohen Ansprüchen der industriellen Farbbilderfassung (z. B. möglichst kontinuierliches Spektrum, hohe Farbtemperatur, hohe Lebensdauer) genügen. Kameras und Lichtquellen werden in Auflichtanordnung über der gesamten Warenbahn kaskadiert.

Zur Bewältigung des hohen Datenaufkommens und zur Realisierung einer effizienten Fehlerdetektion ist die Parallelisierung der Bildverarbeitung mit leistungsfähigen Mehrprozessorsystemen notwendig. Das Parallellisierungskonzept sollte primär spurorientiert² sein.

Die Bildakquirierung kommt systembedingt nicht ohne Korrekturen der Bilddaten aus. Hervorzuheben sind hier die Shadingkorrektur, die Farbkalibrierung und geometrische Korrekturen, die vor allem durch Kaskadierungsungenauigkeiten erforderlich sind.

4 Farbmusterinspektion

4.1 Fehlerdetektionsansätze

Die visuelle Oberflächeninspektion der Druckware erfolgt subjektiv, wobei der Warenschauer ausgehend von einer eingepprägten Mustervorlage mustertypische Fehler erkennt und klassifiziert. Die Leistungsfähigkeit des Menschen besteht dabei weniger in der Siche-

¹ lt. Befragung von Textildruckfirmen, die Leistungswerte verfügbarer Gerätetechnik liegen noch höher

² streifenförmige Aufteilung der Warenbahn und separate Bildverarbeitung mit zugeordneter Rechentechnik

rung der Mustermaßhaltigkeit als vielmehr in der Detektion lokaler Besonderheiten, die durch qualitative Musterveränderung seine Aufmerksamkeit erregen. Allmählich eintretende und globale Abweichungen werden meist erst ab einem bestimmten Fehlergrad oder durch wiederholten Vergleich mit der Mustervorlage erkannt. Dies trifft besonders auf Farbabweichungen zu. Für eine sichere und ganzheitliche Fehlerdetektion ist also der ständige Vergleich mit der Mustervorlage unerlässlich.

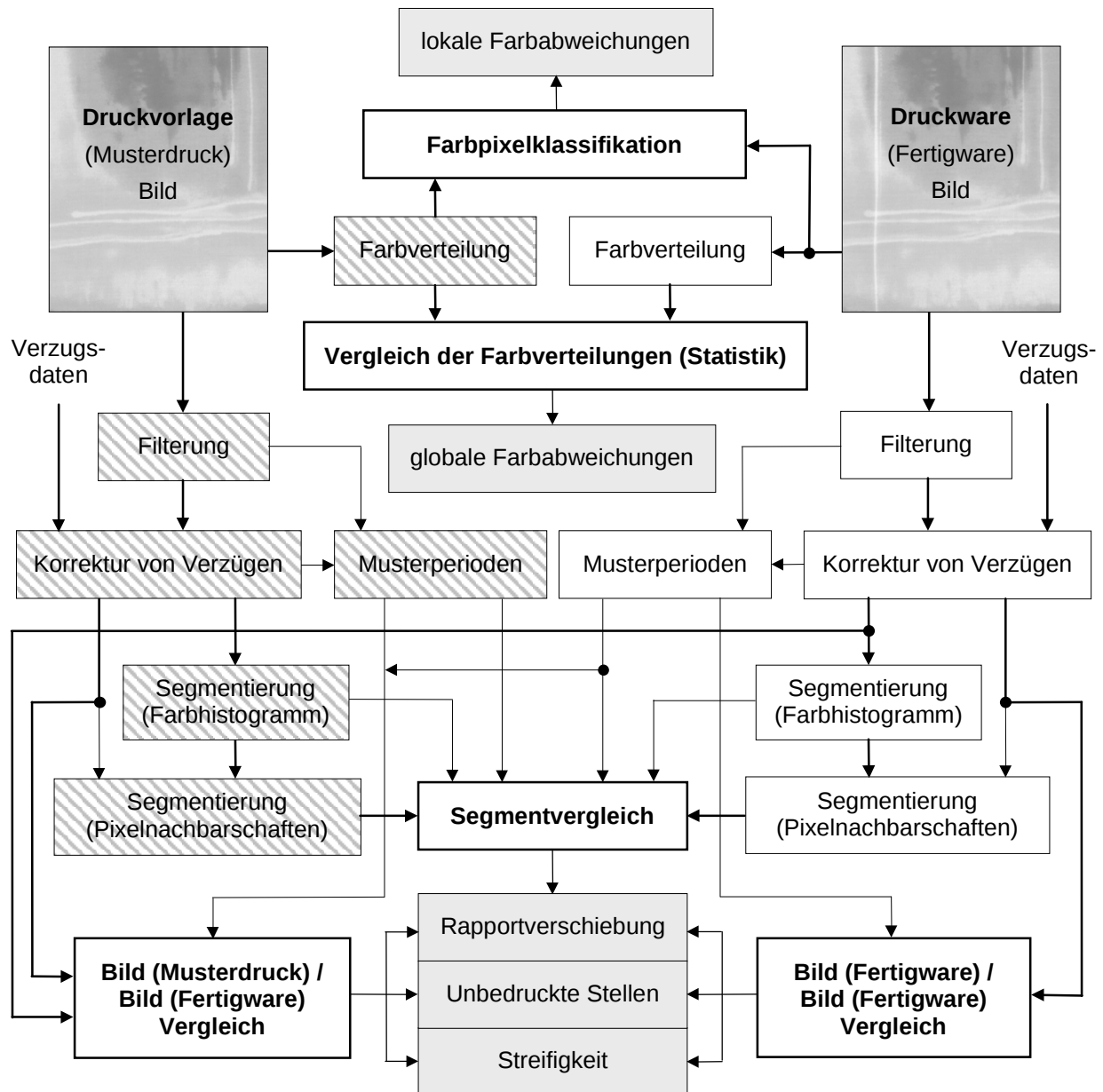


Abb. 2 Fehlerdetektionsansätze für Druckmuster (gestreift: Belehrungsphase, fett: Vergleichsverfahren und wesentliche Operationsverknüpfungen) [1]

Was für die visuelle Oberflächeninspektion gilt, trifft für deren Automatisierung noch viel stärker zu. Generell läßt sich sagen, daß alle Automatisierungsansätze immer auf dem Vergleich zwischen einem Gutmuster (separat gedruckte oder aus der Druckware fehlerfrei generierte Mustervorlage) und der Druckware basieren müssen, wobei Fehler sich durch Abweichungen vom Gutmuster manifestieren. Aufgrund der Vielfältigkeit und Komplexität der Muster sowie gleichzeitiger Echtzeitforderungen kann der Vergleich nur auf niedriger Abstraktionsstufe, also auf Pixel- oder Labelniveau, erfolgen. Abbildung 2 gibt einen Überblick zu möglichen Fehlerdetektionsansätzen.

Bei dem Bild-Bild-Vergleich zwischen Mustervorlage und Druckware wirkt sich die Texturierung textiler Oberflächen als störend aus und muß mittels Tiefpaßfilterung unterdrückt werden. Erfolgt die Warenschau als abschließende Endkontrolle, muß weiterhin mit Warenverzug und verändertem Rapport gerechnet werden. Dies erfordert einerseits die genaue Bestimmung von Verzug und Rapport und andererseits deren fehlerminimale Korrektur durch geometrische Transformation der Bilddaten. Für die Bestimmung eignen sich musterorientierte Korrelationsverfahren, welche jedoch zur Tolerierung von Druckfehlern sehr robust ausgelegt sein müssen. Zu deren Unterstützung ist auch eine fadenbasierte Verzugsmessung auf hochaufgelösten Bildern oder mit Speziälsensoren (z. B. Schlitzsensoren) denkbar. Da trotz aufwendiger Korrekturmaßnahmen nicht mit einem verzugsfreien Druckmuster gerechnet werden kann, muß der Bild-Bild-Vergleich leichte Musterverzerrungen tolerieren können.

Außer dem pixelorientierten Bild-Bild-Vergleich kann der Vergleich der Farbhistogramme zur globalen Fehlerdetektion (z. B. Farbscheinigkeit) beitragen. Lokale Druckfehler, deren Farbvalenzen in der Mustervorlage nicht enthalten sind, können sehr effizient über eine Farbpixelklassifikation (Vergleich zwischen Druckwarenbild und Farbverteilung der Mustervorlage) ermittelt werden.

4.2 Detektion von „Blitzern“

Eine häufige und bereits mit kleinsten Ausmaßen störende Variante der Druckrapportverschiebung ist der sogenannte „Blitzer“, der als unbedruckte Stelle mit Rohwarenfärbung erscheint (siehe Abb. 4). Für diesen Fehlertyp eignen sich unter anderem die Farbpixelklassifikation und der pixelbasierte Bild-Bild-Vergleich, welche im Anschluß näher erläutert werden sollen.

Durch die geringe Dimension des Farbvektors kann die Farbpixelklassifikation sehr effizient in Form einer 3D-Look-up-Table (mit 6 bit Auflösung) realisiert werden. Zur Erfassung der Farbverteilung wird jede in der Mustervorlage enthaltene Farbvalenz als bekannte Farbe (maximaler Bekanntheitsgrad) in die Look-up-Table eingetragen. Gleichzeitig wird der Bekanntheitsgrad benachbarter Farbvalenzen um einen mit zunehmender Distanz gaußförmig abfallenden Wert erhöht. Im Ergebnis entstehen kompakte Gebiete bekannter Farben, an dessen Rand der Bekanntheitsgrad der Farbvalenzen allmählich abnimmt. Bei der Klassifizierung der Druckware wird jedem Pixel dessen Farbbekanntheitsgrad zugewiesen, womit eine lokale Detektion von Farbabweichungen mit guter Differenzierung möglich ist. Ein binäres Fehlerbild von Abbildung 4b nach der Farbpixelklassifikation zeigt Abbildung 5. Die „Blitzer“ werden schnell und zuverlässig erkannt.

Der pixelbasierte Bild-Bild-Vergleich als zweiter Lösungsansatz ist zwar erheblich zeitintensiver, verfügt aber über das höhere Leistungsvermögen. Nach einer Tiefpaßfilterung (z. B. Binomialfilter) von Musterdruck und Druckware erfolgt die Verzugskorrektur, wobei die Verzugsdaten als korrespondierende Punktpaare (Landmarken) von Musterdruck und Druckware vorliegen sollen. Für die Verzugskorrektur empfiehlt sich die Verwendung zweidimensionaler Oberflächensplines (Thin-Plate-Splines) [3]. Sie besitzen die vorteilhafte Eigenschaft, daß bei Verwendung beliebig vorgegebener Landmarkenpositionen eine glatte, zweidimensionale Fläche ohne Kombination von eindimensionalen Splines berechnet wird. Die Oberflächensplines werden jeweils separat für die Bewegungsrichtung und quer dazu bestimmt. Für die Landmarke L_k als Stützstelle (i_k, j_k) ergeben sich die Funktionswerte mit $(j_k - n_k)$ in Bewegungsrichtung und $(i_k - m_k)$ quer zur Bewegungsrichtung, wobei i, j, m, n die Koordinaten (Indizes) der bei L_k korrespondierenden Bildpunkte x_{Sijk} (Mustervorlage) und x_{Imnk} (Druckware) darstellen ($k=1(1)N$, N ...Anzahl der Landmarken). Mit Hilfe der beiden Splinefunktionen wird das Bild der Druckware identisch

zur Mustervorlage „verzogen“. Zur Tolerierung fehlerhafter Verzugsmeßwerte sollten Oberflächensplines mit approximierender Parametrierung eingesetzt werden.

Die eigentliche Fehlerdetektion erfolgt als Bild-Bild-Vergleich nach (1).

$$y_{mn} = \begin{cases} 0 & \leftrightarrow \exists x_{sij} (x_{sij} \in M_{mn} \wedge |x_{sij} - x_{lmn}| < \varepsilon) \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (1)$$

mit y_{mn} ...Pixel des binären Fehlerbildes (Fehler $\rightarrow 1$), x_{sij} ...i-j-tes Farbpixel der Mustervorlage (Sollmuster), x_{lmn} ...m-n-te Farbpixel der zu prüfenden Druckware (Istmuster), ε ...Schwellwert, M_{mn} ...Nachbarschaftsmenge um das m-n-te Farbpixel der Mustervorlage

Dabei wird zu jedem Pixel des Druckwarenbildes in der Nachbarschaft des korrespondierenden Mustervorlagepixels eine Farbabweichung gesucht, die unterhalb einer vorgegebenen Fehlerschwelle liegt. Trifft dies auf keines der Pixel in der Nachbarschaftsmenge zu, so wird der betrachtete Bildpunkt als Fehler markiert. Durch die vorherige Verzugskorrektur kann dieser bezüglich des Pixelortes „unscharfe“ Bild-Bild-Vergleich in kleiner Nachbarschaftsumgebung durchgeführt werden, wodurch die Detektion von Fehlern mit geringen Abmessungen möglich ist.

Mit Abbildung 6a-c wird die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Bild-Bild-Vergleichs demonstriert. Wie bei der Farbpixelklassifikation werden auch hier alle „Blitzer“ detektiert. Darüber hinaus können aber auch Musterabweichungen erkannt werden, die sich nicht durch unbekannte Farbvalenzen bemerkbar machen, so geschehen bei dem in Abbildung 4b enthaltenen Schablonenfehler.

Die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit von Farbpixelklassifikation und pixelbasiertem Bild-Bild-Vergleich können durch kombinierte Anwendung zur Fehlerklassifikation nutzbar gemacht werden. So kann hier eine Unterscheidung zwischen „Blitzer“ und anderen Musterabweichungen erfolgen. Ebenso ist aber auch die Trennung zwischen „Blitzer“ und durch Faltenbildung verursachter, unbedruckter Stelle möglich.

5 Zusammenfassung

Die automatisierte Oberflächeninspektion von mehrfarbig bedruckter, textiler Bahnenware stellt hohe Anforderungen an die Bildverarbeitung. Dies betrifft sowohl die einzusetzende Hardware als auch die algorithmische Lösung der Fehlerdetektion. Die Spezifika der Muster und Fehler erfordern vergleichende Fehlerdetektionsverfahren, wobei auf niederem Abstraktionsniveau gearbeitet werden muß. Am Beispiel der Detektion von „Blitzern“ konnte die Lösbarkeit der Aufgabe demonstriert werden. Sowohl mit der Farbpixelklassifikation als auch mit dem „unscharfen“, pixelbasierten Bild-Bild-Vergleich ist eine zuverlässige Fehlererkennung möglich. Bei der Warenendkontrolle hängt die Leistungsfähigkeit des Bild-Bild-Vergleichs entscheidend von der Güte der Verzugskorrektur ab, wobei vor allem die Verzugsmessung essentiell ist. Durch kombinierte Anwendung mehrerer Detektionsverfahren läßt sich eine hohe Erkennungssicherheit und differenzierte Fehlerklassifikation erreichen.

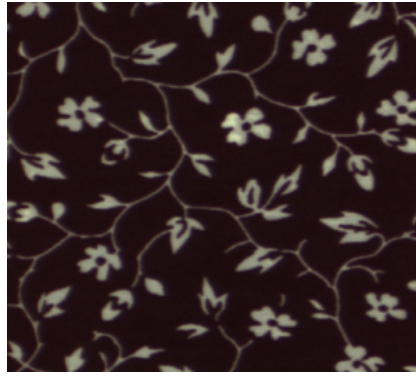
6 Literaturquellen

- [1] Franke, K.-H.; Nickolay, B.; Lucht, C.; Nowack, C.; Rösel, G.-S.: „Neue Bildverarbeitungstechnologien für die automatisierte optische Kontrolle strukturierter Oberflächen in der Produktion“, Schriftenreihe des FKM e.V. (Forschungshefte), 1999
- [2] TGL 50 098: „Fehler in textilen Stoffen“, Fachbereichsstandard der DDR, 1987, Forschungsinstitut für Textiltechnologie Karl-Marx-Stadt
- [3] Bookstein, F.L.: „Principal Warps: Thin-Plate Splines and the Decomposition of Deformations“, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 2, 1989, S. 567-585

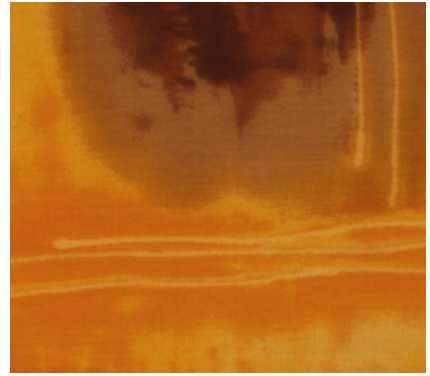
Farbbilder



a.) Druckrapportverschiebung (z. B. gelb und rot)



b.) Farbscheinigkeit (weiße statt beige Ranken)



c.) unbedruckte Stelle durch Faltenbildung

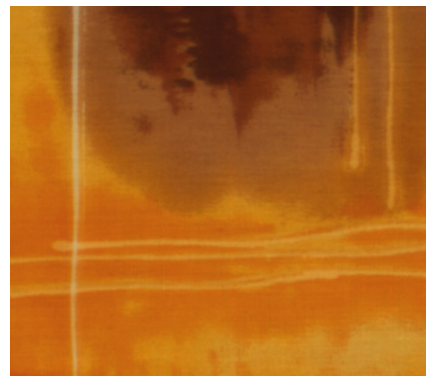
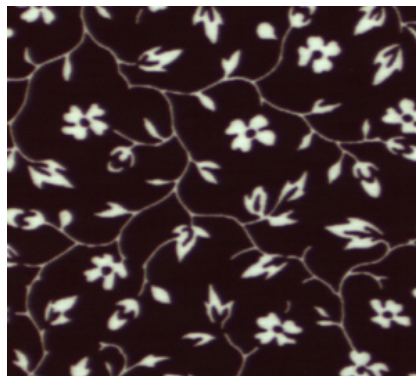
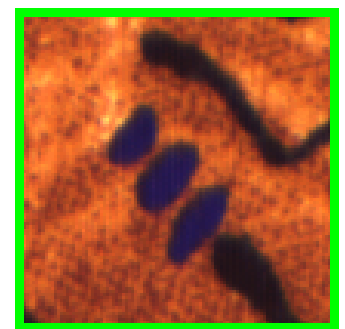
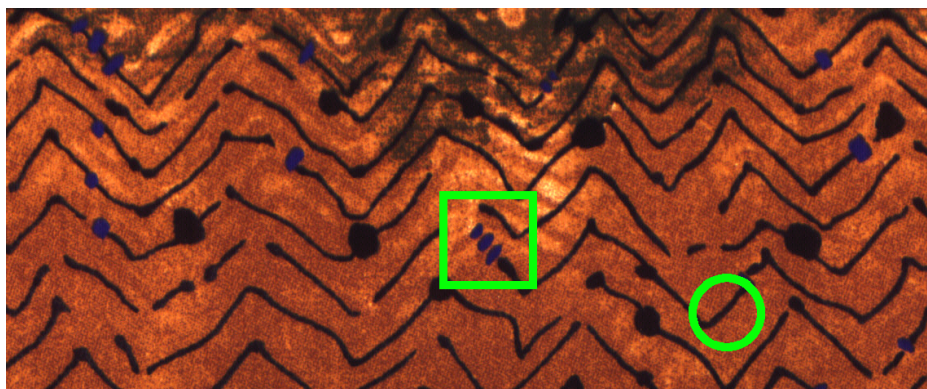
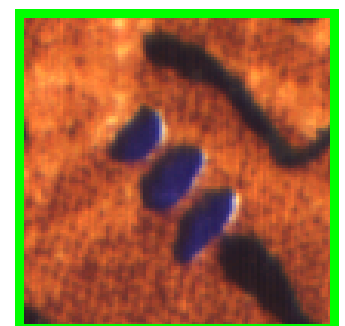
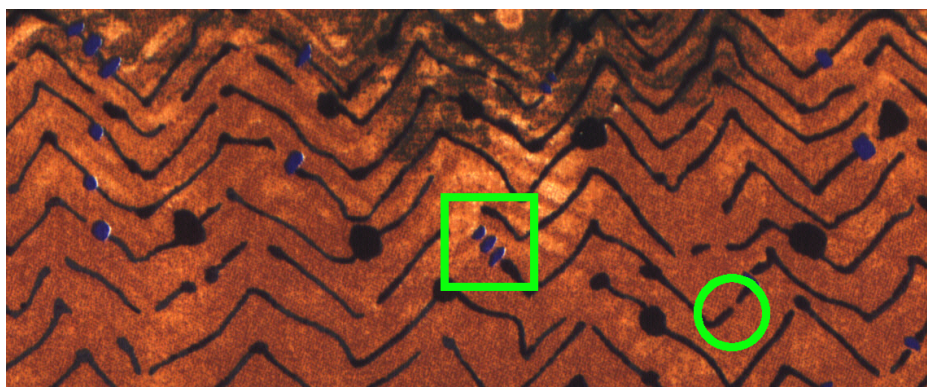


Abb. 3 Druckfehlerbeispiele (oben: Gutmuster, unten: fehlerhafter Druck)

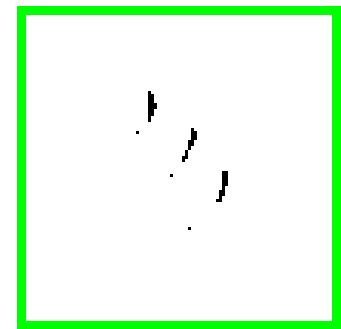
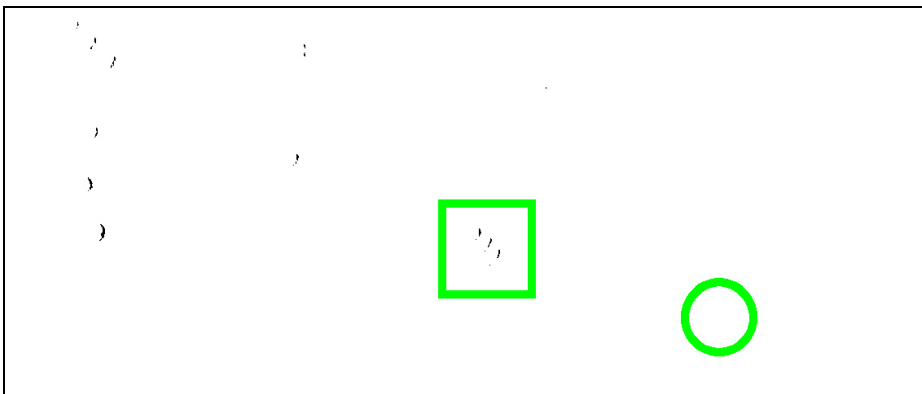


a.) Gutmuster



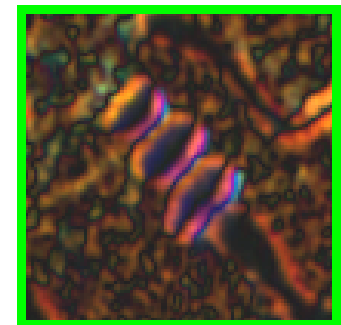
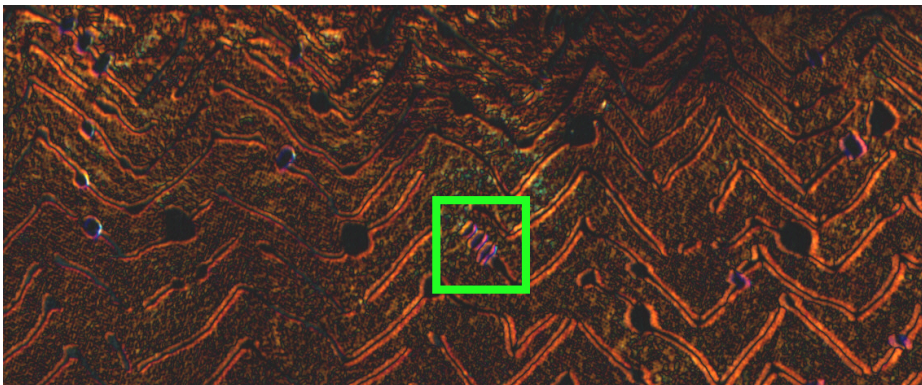
b.) fehlerhafter Druck

Abb. 4 Druckrapportverschiebung - „Blitzer“ (Druckmuster und Ausschnitt) sowie Schablonenfehler (kreisförmige Markierung)

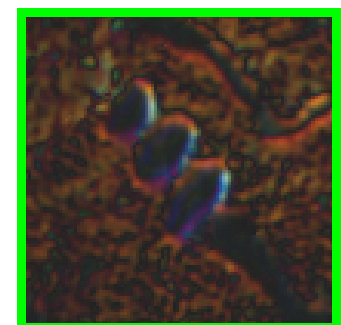
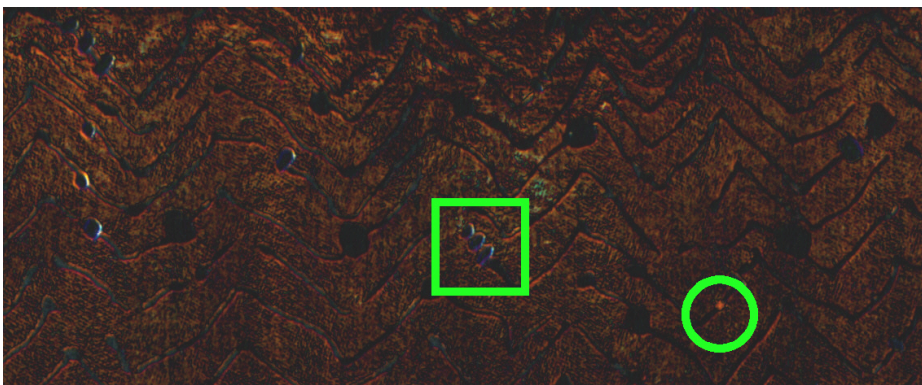


binäres Fehlerbild

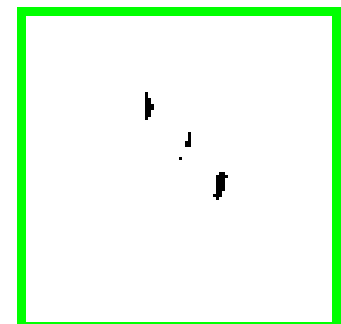
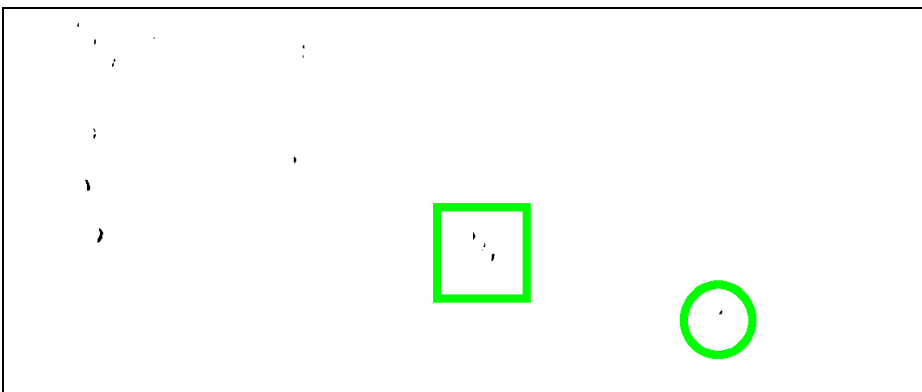
Abb. 5 Fehlerdetektion mittels Farbpixelklassifikation (Druckmuster und Ausschnitt), Bereich des Schablonenfehlers ist kreisförmig markiert



a.) Differenzbild



b.) Differenzbild nach Verzugskorrektur



c.) binäres Fehlerbild

Abb. 6 Fehlerdetektion mit „unscharfem“ (5×5-Nachbarschaft), pixelbasiertem Bild-Bild-Vergleich (Druckmuster und Ausschnitt), Bereich des Schablonenfehlers ist kreisförmig markiert (Differenzbilder wurden aufgehellt und kontrastverstärkt)