



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 601 15 314 T2** 2006.08.03

(12)

## Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 148 332 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **601 15 314.6**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **01 109 375.4**

(96) Europäischer Anmeldetag: **18.04.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **24.10.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **30.11.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **03.08.2006**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G01N 21/898** (2006.01)  
**G01N 21/896** (2006.01)

(30) Unionspriorität:

**197708 P            18.04.2000        US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**CH, DE, GB, LI**

(73) Patentinhaber:

**The University of Hong Kong, Hong Kong, HK**

(72) Erfinder:

**Kwok-Hung, Grantham Pang, Pokfulam Road, CN;  
Aiay, Kumar, Pokfulam, CN**

(74) Vertreter:

**Schwabe, Sandmair, Marx, 81677 München**

(54) Bezeichnung: **Verfahren für die Auswertung von Bildern zur Defekterkennung**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung**

## GEBIET DER ERFINDUNG

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren nach Anspruch 1 zum Untersuchen eines Bahnmaterials, das Fehler enthalten kann. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung auch die Untersuchung von texturierten Materialien, um Fehler darin zu erfassen.

## BESCHREIBUNG DES STANDES DER TECHNIK

**[0002]** Die automatisierte Herstellung erfordert eine automatisierte Untersuchung von industriellen Materialien, wie z. B. Textil, Papier und Kunststoff. Die automatisierte Untersuchung von industriellen Materialien benötigt adaptive Lösungen, die in Echtzeit ausgeführt werden können. Derzeit ist ein Schlüsselement der Qualitätssicherung in Produktionslinien die manuelle Untersuchung. Die manuelle Untersuchung ist arbeitsintensiv und unzureichend, um die Qualitätsstandard bei der Produktion mit hoher Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten. In der Textilindustrie werden beispielsweise nur etwa 70% der Fehler durch manuelle Untersuchung selbst mit sehr geübten Prüfern erfasst. Daher ist die Automatisierung der Aufgabe der visuellen Untersuchung erwünscht, um die Effizienz von Produktionslinien zu erhöhen und ebenso die Qualität des Produkts zu verbessern.

**[0003]** Die industrielle Untersuchung hat äußerst hohe Anforderungen und ist im Vergleich zu anderen Untersuchungsproblemen am herausforderndsten. Eine typische Bahn ist 1,8–3,0 m (6–10 Fuß) breit und wird mit der Geschwindigkeit von 20–60 m/min verarbeitet. Folglich ist der Durchsatz für 100% Untersuchung ungeheuer, z. B. 10–15 MB Bilddaten pro Sekunde, wenn eine Zeilenabstastkamera verwendet wird. Daher erfordern die brauchbarsten Lösungen zusätzliche Hardwarekomponenten und eine Verringerung der Rechenkomplexität.

**[0004]** Die Fehlererfassung in industriellen Materialien war ein Thema von beträchtlicher Forschung unter Verwendung von verschiedenen Vorgehensweisen. Die Forscher haben häufig Gewebeproben verwendet, um das allgemeine Problem der Fehlererfassung in verschiedenen texturierten Materialien nachzubilden. Verschiedene Methoden, die den Mittelwert und die Standardabweichung von Unterblöcken, eine Graustufenmatrix für gleichzeitiges Auftreten und die Autokorrelation von Bildern verwenden, wurden zur Charakterisierung von Gewebefehlern verwendet. Auf der mikroskopischen Ebene verringert sich das breite Spektrum von verschiedenen Materialuntersuchungsproblemen auf Texturanalyseprobleme. Verschiedene Forscher haben versucht, dieses Problem mit verschiedenen Methoden anzugehen, die von der Modellierung des Gauß-Markov-Zufallsfeldes (GMRF), Karhunen-Loève-Zerlegung, Gabor-Filter, Wavelet-Transformation bis zu neuronalen Netzen reichen.

**[0005]** Die Periodizität von Garnen in Textilbahnen führt zu Fourierbereichsmerkmalen und wurde verwendet, um Gewebefehler zu untersuchen. Das US-Patent Nr. 4 124 300, erteilt an Mead u. a. am 7. November 1978, erörtert eine solche Methode. Verfahren auf Fouriertransformationsbasis sind für Fehler geeignet, die eine globale Verzerrung einer Basisstruktur verursachen, aber für lokale Fehler, die gewöhnlich in einem kleinen Bereich von Bildern auftreten, erfolglos. Folglich erfordert die Erfassung von lokalen Gewebefehlern gleichzeitige Messungen im räumlichen und Raumfrequenzbereich. Folglich wurden Texturmerkmale auf der Basis der Mehrskaligen-Wavelet-Darstellung (MSWAR) verwendet, um lokale Gewebefehler zu erfassen. Das US-Patent Nr. 5 815 198, erteilt an Vachtsevanos u. a., 29. September 1998, offenbart eine solche Methode.

**[0006]** EP-A 0 974 831 offenbart eine Vorrichtung und ein Verfahren zur integrierten Verarbeitung von Fehlerbildern. Das darin offenbarte Verfahren verwendet Pixelberechnungen und die Verwendung eines Gitters, das im Wesentlichen ähnlich der Maske ist.

**[0007]** EP-A-0 742 431 offenbart ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Erfassen von Defekten in sich bewegenden Geweben oder dergleichen. Das Verfahren umfasst die Schritte des Erzeugens eines Bildes des Gewebes und des Aufzeichnens des Bildes, des Digitalisierens des resultierenden Videosignals, des Übertragens des digitalisierten Bildes zu mehreren verschiedenen Erfassungskanälen, die gleichzeitig arbeiten, des Aufteilens des modellierten Bildes für jeden Kanal in Vektorkantenelemente, die die lokale betroffene Defekttextur darstellen, des Rekonstruierens des Defekttyps, der gesucht wird, für jeden Kanal auf der Basis der Kantenelemente und unter Verwendung von angepassten Fenstern des Auswertens der Gewichtskomponenten aller Kantenelemente, die in jedem der Fenster enthalten sind, und des Angebens zumindest, wenn der Fall eintritt, der Anwesenheit, der Art und/oder der Position der möglicherweise erfassten Defekte.

**[0008]** US-Patent Nr. 5 774 177, Lane, offenbart ein Verfahren, das das Ausbilden eines Gradientenbildes unter Verwendung von einigen Masken (unter Verwendung des Faltungsverfahrens), gefolgt von der Begrenzung durch Schwellenwerte und anderen gut bekannten Bildverarbeitungsverfahren, umfasst. Die Masken werden verwendet, um eine Faltungsoperation an den Pixeln durchzuführen.

**[0009]** Das US-Patent Nr. 5 301 129, McKaughan u. a. basiert auf dem üblichen Verfahren des Filterns (unter Verwendung von Masken) zum Durchführen einer Faltung, um die "Hintergrundtextur" so weit wie möglich zu beseitigen, und dann des Verwendens einer Begrenzung durch Schwellenwerte, um die Fehler zu zeigen. Das US-Patent Nr. 5 737 072, Emery u. a., offenbart die Untersuchung von gemusterten Oberflächen oder Substraten wie z. B. Photomasken, auf ungewollte Teilchen wie z. B. Fehler.

**[0010]** Das US-Patent Nr. 5 825 501, Mee u. a., offenbart das Erhalten der Garndichte in Textilgeweben mit einem Ziel, die Anzahl von Schussgarnen pro Einheitslänge zu überwachen.

**[0011]** Das US-Patent Nr. 4 630 304, Borth u. a., offenbart eine Hintergrundrausch-Schätzvorrichtung zur Verwendung in einem Rauschunterdrückungssystem, um eine Sprachqualitätsverbesserung durchzuführen.

**[0012]** Das US-Patent Nr. 5 740 048, Abel u. a., offenbart die Verarbeitung von Daten von einem Positionierungs- oder Navigationssystem wie z. B. Navigationssystemdaten eines globalen Positionsbestimmungssystems (GPS). Das offenbarte Glättungsfilter (Kalman-Filter) wird zur Verarbeitung von eindimensionalen Signalen verwendet.

**[0013]** Die vorliegende Erfindung schafft ein Verfahren zum Untersuchen eines Bahnmaterials, das Fehler enthält. Das Verfahren umfasst das Aufnehmen eines Bildes des Bahnmaterials, wobei das aufgenommene Bild eine Vielzahl von Pixeln umfasst; das Dämpfen der Pixel im aufgenommenen Bild, die einem fehlerfreien Bereich entsprechen; das Erhalten der Energie jedes Pixels; und das Segmentieren der Fehler.

**[0014]** Ultraschallwandler zum Untersuchen von industriellen Materialien sind auch bekannt. Das US-Patent Nr. 5 665 907, erteilt an Sheen u. a. am 9. September 1997, offenbart beispielsweise ein Ultraschallsystem zum Erfassen von Gewebefehlern. Das US-Patent Nr. 6 023 334, erteilt an Itagaki u. a. am 8. Februar 2000, offenbart eine Methode zur Verwendung von Helligkeitsinformationen, um homogene Oberflächen wie z. B. glatte Aluminiumbleche oder glattes Glas zu untersuchen.

**[0015]** Der Nachteil von herkömmlichen Methoden besteht darin, dass sie nicht empfindlich genug sind, um einen Fehler zu erfassen, der feine Intensitätsübergänge erzeugt, und daher nicht 100% Untersuchung garantieren können. Ferner erfordern herkömmliche Methoden statistische Berechnungen (z. B. Mittelwert und Standardabweichung) für ihre Online-Implementierung. Solche Berechnungen sind komplex und erfordern eine zusätzliche Hardware.

**[0016]** Daher ist es erwünscht, ein Untersuchungssystem zu schaffen, das keine statistischen Online-Berechnungen erfordert. Es ist auch erwünscht, ein System zu schaffen, das in der Lage ist, Fehler zu erfassen, die sehr feine Intensitätsübergänge in aufgenommenen Bildern erzeugen. Die vorliegende Erfindung schafft ein Untersuchungssystem, das die Mängel von existierenden Verfahren zur Fehlererfassung beseitigt.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

**[0017]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Untersuchen eines Bahnmaterials, um Fehler zu erfassen, gemäß Anspruch 1. Vorteilhafte Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in den Unteransprüchen definiert.

**[0018]** Gemäß der Erfindung umfasst das Verfahren zum Untersuchen eines Bahnmaterials, das Fehler enthalten kann, die folgenden Schritte: Aufnehmen eines Bildes des Bahnmaterials, wobei das aufgenommene Bild eine Vielzahl von Pixeln umfasst; Verarbeiten der Pixel, um Fehler zu identifizieren, und Segmentieren der identifizierten Fehler; gekennzeichnet durch die folgenden Schritte zur Verarbeitung der Pixel: a) Dämpfen der Pixel in dem aufgenommenen Bild mit einem Filter unter Verwendung der Werte von Pixeln in einem fehlerfreien Bereich des untersuchten Bahnmaterials, der ein Teil des aufgenommenen Bildes ist; b) Erhalten der Energie von jedem der gedämpften Pixel, um Fehler zu identifizieren.

**[0019]** Die Energie von Pixeln in einem fehlerfreien Bereich und in einem Fehlerbereich kann beispielsweise erhalten werden, um Fehler zu segmentieren. In einer Ausführungsform kann ein nichtrekursives Filter (FIR)

verwendet werden, um diejenigen Frequenzen auszuwählen, die die Energie eines lokalen fehlerfreien Bereichs von jener eines lokalen Fehlerbereichs unterscheiden können, um dadurch Fehler zu erfassen.

[0020] Eine Filtervorrichtung zum Untersuchen eines Bahnmaterials, um Fehler zu erfassen, unter Verwendung des Verfahrens der Erfindung kann durch zuerst Erhalten der Korrelationsmatrizes von den Gewebeproben und der Eigenvektoren entworfen werden. Dann kann der Eigenvektor, der die maximale Objektfunktion ergibt, ausgewählt werden. Das optimale Filter  $h_{op}(x, y)$  kann erhalten werden, wie z. B. durch Invertieren der lexikographischen Umordnung.

#### KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0021] Die vorliegende Erfindung wird aus der folgenden Beschreibung in Verbindung mit den begleitenden Zeichnungen besser ersichtlich, in denen:

[0022] Fig. 1 ein Blockdiagramm eines Untersuchungssystems mit einem optimalen Filter, das gemäß der vorliegenden Erfindung gebildet ist, ist.

[0023] Fig. 2 ein Merkmalsextraktionsmodell zum Bilden der optimalen Filter der vorliegenden Erfindung zeigt.

[0024] Fig. 3(a) bis Fig. 3(i) experimentelle Ergebnisse mit einer Gewebeprobe mit einem Schussfehler zeigen, wobei Fig. 3(a) eine Gewebeprobe mit Schussfehlern zeigt, Fig. 3(b) das Bild nach Filtern mit einem optimalen  $7 \times 7$ -Filter zeigt, Fig. 3(c) die lokale Energieschätzung des Bildes in Fig. 3(b) zeigt, Fig. 3(d) segmentierte Fehler nach Begrenzung des Bildes von Fig. 3(b) durch Schwellenwerte zeigt, Fig. 3(e) segmentierte Fehler nach Begrenzung des Bildes in Fig. 3(b) durch Schwellenwerte zeigt, Fig. 3(f) ein zweidimensionales Maschendiagramm der lokalen Energieschätzung zeigt, Fig. 3(g) ein zweidimensionales Maschendiagramm des durch Schwellenwerte begrenzten Bildes von Fig. 3(e) zeigt, Fig. 3(h) den Amplituden-Frequenz-Gang des optimalen  $7 \times 7$ -Filters zeigt und Fig. 3(i) die Objektfunktion für jeden der 49 Eigenvektoren zeigt.

[0025] Fig. 4(a) bis Fig. 4(p) experimentelle Ergebnisse von Gewebeproben mit Fehlern zeigen, die mit den optimalen Filtern erfasst werden, die gemäß der vorliegenden Erfindung entworfen sind, wobei die Fig. 4(a), Fig. 4(e), Fig. 4(i) und Fig. 4(m) Proben einer falschen Streckung, eines gefärbten Garns, eines gebrochenen Endes bzw. eines schmutzigen Garns zeigen; Fig. 4(b), Fig. 4(f), Fig. 4(j) und Fig. 4(n) entsprechende lokale Energieschätzungen zeigen, die durch das optimale Filter erhalten werden, das mit der Kriterienfunktion  $J_1(h_{op})$  entworfen ist; Fig. 4(c), Fig. 4(g), Fig. 4(k) und Fig. 4(o) entsprechende lokale Energieschätzungen zeigen, die durch das optimale Filter erhalten werden, das mit der Kriterienfunktion  $J_2(h_{op})$  entworfen ist; und Fig. 4(d), Fig. 4(h), Fig. 4(l) und Fig. 4(p) entsprechende lokale Energieschätzungen zeigen, die durch das optimale Filter erhalten werden, das mit der Kriterienfunktion  $J_3(h_{op})$  entworfen ist.

[0026] Fig. 5(a) bis Fig. 5(p) Erfassungsergebnisse für Gewebeproben mit Fehlern zeigen, wobei Fig. 5(a), Fig. 5(e), Fig. 5(i) und Fig. 5(m) Proben eines Doppelschusses, einer großen Noppe, eines gebrochenen Garns bzw. eines Dreifachkettfadens zeigen; Fig. 5(b), Fig. 5(f), Fig. 5(j) und Fig. 5(n) entsprechende gefilterte Bilder mit optimalen Filtern der vorliegenden Erfindung zeigen; Fig. 5(c), Fig. 5(g), Fig. 5(k) und Fig. 5(o) entsprechende lokale Energieschätzungen zeigen; und Fig. 5(d), Fig. 5(h), Fig. 5(l) und Fig. 5(p) segmentierte Fehler zeigen.

[0027] Fig. 6(a) bis Fig. 6(d) die Erfassungsergebnisse eines Schussfehlers mit einer optimalen  $3 \times 3$ -Filtermaske zeigen, wobei die Fig. 6(a) bis Fig. 6(d) die Gewebeproben zeigen; Fig. 6(b) und Fig. 6(e) lokale Energieschätzungen zeigen; und Fig. 6(c) und Fig. 6(f) durch Schwellenwerte begrenzte Fehler zeigen.

[0028] Fig. 7 ein Blockdiagramm einer auf einem optimalen Filter basierenden Bahnuntersuchung gemäß der vorliegenden Erfindung ist.

[0029] Fig. 8 ein Blockdiagramm eines Kettfaden-Einschuss-Modells ist, das zum Untersuchen eines Bahnmaterials gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet wird.

[0030] Fig. 9(a) bis Fig. 9(d) die Erfassungsergebnisse für einen Gewebefehler in einer vertikalen Richtung zeigen, wobei Fig. 9(a) die Gewebeprobe mit Schussfehler zeigt; Fig. 9(b) das Bild nach Filtern mit einem optimalen Filter zeigt; Fig. 9(c) die lokale Energieschätzung des Bildes von Fig. 9(b) zeigt; und Fig. 9(d) den segmentierten Fehler nach Begrenzen des Bildes von Fig. 9(b) durch Schwellenwerte zeigt.

[0031] Fig. 10(a) bis Fig. 10(e) die Erfassungsergebnisse für eine Gewebefehlererfassung mit dem Kettfaden-Einschuss-Modell zeigen, wobei Fig. 10(a) die Gewebeprobe mit einem Fehler zeigt; Fig. 10(b) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_1$  zeigt; Fig. 10(c) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_2$  zeigt; Fig. 10(d) die kombinierte Ausgabe aus den Filtern  $h_1$  und  $h_2$  zeigt; und Fig. 10(e) den segmentierten Fehler nach Begrenzung des Bildes von Fig. 10(d) durch Schwellenwerte zeigt.

[0032] Fig. 11(a) bis Fig. 11(e) die Erfassungsergebnisse für die Gewebefehlererfassung mit dem Kettfaden-Einschuss-Modell zeigen, wobei Fig. 11(a) die Gewebeprobe mit einem Fehler zeigt; Fig. 11(b) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_1$  zeigt; Fig. 11(c) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_2$  zeigt; Fig. 11(d) die kombinierte Ausgabe aus den Filtern  $h_1$  und  $h_2$  zeigt; und Fig. 11(e) den segmentierten Fehler nach Begrenzung des Bildes von Fig. 11(d) durch Schwellenwerte zeigt.

[0033] Fig. 12(a) bis Fig. 12(e) die Erfassungsergebnisse für die Gewebefehlererfassung mit dem Kettfaden-Einschuss-Modell zeigen, wobei Fig. 12(a) die Gewebeprobe mit einem Fehler zeigt; Fig. 12(b) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_1$  zeigt; Fig. 12(c) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_2$  zeigt; Fig. 12(d) die kombinierte Ausgabe aus den Filtern  $h_1$  und  $h_2$  zeigt; und Fig. 12(e) den segmentierten Fehler nach Begrenzen des Bildes von Fig. 12(d) durch Schwellenwerte zeigt.

[0034] Fig. 13(a) bis Fig. 13(e) die Erfassungsergebnisse für die Gewebefehlererfassung mit dem Kettfaden-Einschuss-Modell zeigen, wobei Fig. 13(a) die Gewebeprobe mit einem Fehler zeigt; Fig. 13(b) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_1$  zeigt; Fig. 13(c) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_2$  zeigt; Fig. 13(d) die kombinierte Ausgabe aus den Filtern  $h_1$  und  $h_2$  zeigt; und Fig. 13(e) den segmentierten Fehler nach Begrenzung des Bildes von Fig. 13(d) durch Schwellenwerte zeigt.

[0035] Fig. 14(a) bis Fig. 14(e) die Erfassungsergebnisse für die Gewebefehlererfassung mit dem Kettfaden-Einschuss-Modell zeigen, wobei Fig. 14(a) die Gewebeprobe mit einem Fehler zeigt; Fig. 14(b) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_1$  zeigt; Fig. 14(c) die Ausgabe aus dem optimalen Filter  $h_2$  zeigt; Fig. 14(d) die kombinierte Ausgabe aus den Filtern  $h_1$  und  $h_2$  zeigt; und Fig. 14(e) den segmentierten Fehler nach der Begrenzung des Bildes von Fig. 14(d) durch Schwellenwerte zeigt.

## AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0036] Ein beispielhaftes Untersuchungsverfahren und eine beispielhafte Untersuchungsvorrichtung, die die Prinzipien der vorliegenden Erfindung verkörpern, sind in den ganzen Zeichnungen gezeigt und werden nun im Einzelnen beschrieben.

[0037] Fig. 1 zeigt das Blockdiagramm der vorliegenden Erfindung, das gebildet ist, um das Bild von Fehlern an einem Bahnmaterial zu untersuchen und dadurch diese zu erfassen. Gemäß der vorliegenden Erfindung können die Werte von Pixeln in einem fehlerfreien Bereich relativ zu denjenigen in einem Fehlerbereich in verschiedenen Weisen erheblich gedämpft werden. Die Energie von Pixeln in einem fehlerfreien Bereich und in einem Fehlerbereich kann beispielsweise erhalten werden, um die Fehler zu erfassen. In einer bevorzugten Ausführungsform kann ein nichtrekursives (FIR) Filter verwendet werden, um diejenigen Frequenzen aus den Untersuchungsbildern zu extrahieren, die die Energie eines lokalen fehlerfreien Bereichs von jener eines lokalen Fehlerbereichs unterscheiden. Die Einzelheiten von optimalen Filtern werden nachstehend beschrieben.

### 1. Mathematische Grundlagen

[0038] Fig. 2 zeigt eine beispielhafte Ausführungsform eines Merkmalsextraktionsmodells, das verwendet wird, um ein optimales Filter der vorliegenden Erfindung zu bilden. In einer Ausführungsform kann die Textur im Bild durch z. B. eine Autokorrelationsfunktion der Textur nachgebildet werden. Die Energie kann z. B. durch Quadrieren der Nichtlinearität extrahiert werden. Der Ausdruck für den Merkmalsmittelwert und seine Ableitung kann durch Modellieren des Texturbildes erhalten werden. Durch Auswählen einer geeigneten Kostenfunktion für die Optimierung können die optimalen Filter durch eine iterative Suche oder durch Erzeugen einer Lösung in geschlossener Form entworfen werden.

#### 1.1. Lokale Energieschätzung

[0039] Jedes der aufgenommenen Bilder wird als zufälliger Prozess und als im interessierenden Bereich stationär angenommen.  $x$  und  $y$  sollen die räumlichen Indizes eines aufgenommenen Bildes  $I(x, y)$  sein. Wie in Fig. 2 gezeigt, kann das Filtern eines aufgenommenen Bildes  $I(x, y)$  mit dem Filter  $h_{op}(x, y)$  ein neues Bild  $w(x,$

y) erzeugen:

$$w(x, y) = h_{op}(x, y) * I(x, y)$$

$$= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h_{op}(m, n) I(x-m, y-n), \quad (1)$$

wobei \* eine zweidimensionale Faltung bezeichnet und  $h_{op}(x, y)$  ein optimales  $M \times N$ -Filter ist. Für jedes Pixel in  $w(x, y)$  kann die Ausgabe umgeschrieben werden als:

$$w(x, y) = h_{op}^T i(x, y), \quad (2)$$

wobei  $h_{op}$  und  $i(x, y)$  die Vektoren mit der Länge  $L = M \times N$  sind, die z. B. durch lexikographische Ordnung der Spalten von  $h_{op}(x, y)$  bzw. ein  $M \times N$ -Fenster von  $I(x, y)$  um das Pixel  $(x, y)$  erhalten werden.

$$i(x, y) = \begin{bmatrix} I(x, y) \\ \vdots \\ \vdots \\ I(x, y - N + 1) \\ I(x - 1, y) \\ \vdots \\ \vdots \\ I(x - M + 1, y - N + 1) \end{bmatrix} \quad h_{op} = \begin{bmatrix} h_{op}(0, 0) \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{op}(0, N - 1) \\ h_{op}(1, 0) \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{op}(M - 1, N - 1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

**[0040]** Die Energie an jedem Pixel  $(x, y)$  kann durch Leiten von  $w(x, y)$  durch eine quadrierende Nichtlinearität erhalten werden.

$$z(x, y) = w^2(x, y) \quad (4)$$

**[0041]** Die Energie von jedem Pixel in  $z(x, y)$  wird nun mit Bezug auf einen lokalen Bereich um das Pixel bei  $(x, y)$  berechnet, um eine lokale Energieschätzung zu erhalten. Der lokale Bereich kann durch die Bandbreite eines Glättungsfilters bestimmt werden. In einer Ausführungsform kann die lokale Energieschätzung durch Glätten von  $z(x, y)$  mit einem Filter  $g(x, y)$  erhalten werden, das weiter im Einzelnen beschrieben wird.

$$F(x, y) = z(x, y) * g(x, y)$$

$$= w^2(x, y) * g(x, y) \quad (5)$$

**[0042]** Wie im letzten Block von [Fig. 2](#) gezeigt, sind die Bildmerkmale  $F(x, y)$  die lokalen Energieschätzungen.

**[0043]** Unter der Annahme einer Stationarität im weiten Sinne (WSS) werden der Merkmalsmittelwert  $\mu_f$  und seine Ableitung folgendermaßen modelliert:

$$\mu_f = E\{F(x, y)\}^*$$

$$= E\{z(x, y) * g(x, y)\} = E\{w^2(x, y) * g(x, y)\}$$

**[0044]** Unter der Annahme, dass Glättungsfilterkoeffizienten derart sind, dass  $\sum_{x,y} g(x, y) = 1$ , können wir die obige Gleichung folgendermaßen weiter vereinfachen:

$$\mu_f = E\{w^2(x, y)\} = E\{(h_{op}^T i(x, y))(h_{op}^T i(x, y))\} = h_{op}^T E\{i(x, y) i^T(x, y)\} h_{op} = h_{op}^T R_{ii} h_{op} \quad (6)$$

wobei  $R_{ii} = E\{i(x, y) i^T(x, y)\}$  die Korrelationsmatrix ist und aus der Autokorrelationsfunktion des Bildes  $i(x, y)$  konstruiert werden kann.

$$\frac{\partial \mu_f}{\partial \mathbf{h}_{op}} = \frac{\partial \mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii} \mathbf{h}_{op}}{\partial \mathbf{h}_{op}} = 2 \mathbf{R}_{ii} \mathbf{h}_{op} \quad (7)$$

## 1.2 Objektfunktionen zur Optimierung

[0045] Das Ziel des Entwurfs von optimalen Filtern besteht darin, die Fehler aufzufinden, die in den aufgenommenen Bildern enthalten sind. Wenn in den optimal gefilterten Bildern die Reaktion auf den Fehler stark (z. B. hell) ist, dann kann der Fehler durch einen linearen Zwei-Klassen-Unterscheidungsklassifizierer, typischerweise Begrenzung durch Schwellenwerte, segmentiert werden. Die mittlere lokale Energieschätzung  $\mu_{fd}$  bestimmt die Helligkeit von  $F(x, y)$ . Wir erhalten die Probenbilder von Gewebe mit dem Fehler  $I_d(x, y)$  und diejenigen ohne Fehler  $I_r(x, y)$  als Referenz für die Merkmalsextraktion.  $\mu_{fd}$  und  $\mu_{fr}$  sollen die mittleren lokalen Energieschätzungen für Gewebe mit Fehler bzw. ohne Fehler bezeichnen. Die Objektfunktion  $J_1(\mathbf{h}_{op})$  bewertet das Verhältnis der mittleren lokalen Energie am Ausgang des Filters.

$$J_1(\mathbf{h}_{op}) = \frac{\mu_{fd}}{\mu_{fr}} = \frac{\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_d} \mathbf{h}_{op}}{\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_r} \mathbf{h}_{op}} \quad (8)$$

[0046] Die Optimierung dieser Objektfunktion  $J_1(\mathbf{h}_{op})$  kann das Verhältnis der Merkmalsmittelwerte maximal trennen. Parameter des optimalen Filters  $\mathbf{h}_{op}$ , die der maximalen Objektfunktion  $J_1(\mathbf{h}_{op})$  entsprechen, können beispielsweise erhalten werden, in dem der Gradient auf Null gesetzt wird.

$$\frac{\partial J_1(\mathbf{h}_{op})}{\partial \mathbf{h}_{op}} = \frac{2 \mathbf{R}_{ii_d} \mathbf{h}_{op}}{\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_r} \mathbf{h}_{op}} - \frac{2 \mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_d} \mathbf{h}_{op} \mathbf{R}_{ii_r} \mathbf{h}_{op}}{[\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_r} \mathbf{h}_{op}]^2} = 0$$

[0047] Das Setzen von

$$\Psi = \frac{\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_d} \mathbf{h}_{op}}{\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_r} \mathbf{h}_{op}}$$

in der obigen Gleichung ergibt

$$\mathbf{R}_{ii_r}^{-1} \mathbf{R}_{ii_d} \mathbf{h}_{op} = \Psi \cdot \mathbf{h}_{op} \quad (9)$$

[0048] Dies ist eine Eigenwertgleichung, in der das Filter  $\mathbf{h}_{op}$  der Eigenvektor ist und  $\Psi$  der Eigenwert ist. Der Ausdruck für den Eigenwert  $\Psi$  ist identisch zu  $J_1(\mathbf{h}_{op})$ , der zu optimierenden Objektfunktion. Daher ist das optimale Filter der Eigenvektor  $\mathbf{h}_{op}$ , der die maximale Objektfunktion  $J_1(\mathbf{h}_{op})$  ergibt.

[0049] Eine weitere Objektfunktion, die für die optimale Texturtransformation verwendet wurde, kann auch für die Fehlererfassung verwendet werden und ist nachstehend gegeben:

$$J_2(\mathbf{h}_{op}) = \frac{(\mu_{fd} - \mu_{fr})^2}{\mu_{fd} \mu_{fr}}$$

[0050] Eine Optimierung in geschlossener Form bezüglich dieser Objektfunktion  $J_2(\mathbf{h}_{op})$  kann den relativen Abstand zwischen den Mittelwert der lokalen Energieabschätzungen maximieren.

$$\frac{\partial J_2(\mathbf{h}_{op})}{\partial \mathbf{h}_{op}} = \frac{\partial J_2(\mathbf{h}_{op})}{\partial \mu_{fd}} \frac{\partial \mu_{fd}}{\partial \mathbf{h}_{op}} + \frac{\partial J_2(\mathbf{h}_{op})}{\partial \mu_{fr}} \frac{\partial \mu_{fr}}{\partial \mathbf{h}_{op}} = 0 \quad (10)$$

[0051] Das Einsetzen von Gleichungen (6) und (7) in Gleichung (10) ergibt

$$\mathbf{R}_{ii_r}^{-1} \mathbf{R}_{ii_d} \mathbf{h}_{op} = \Psi \cdot \mathbf{h}_{op} \quad (11)$$

wobei

$$\Psi = \frac{\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_d} \mathbf{h}_{op}}{\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_r} \mathbf{h}_{op}} \quad (12)$$

[0052] Gleichung (11) ist eine Eigenwertgleichung. Das optimale Filter ist durch den Eigenvektor  $\mathbf{h}_{op}$  gegeben, der die maximale Objektfunktion  $J_2(\mathbf{h}_{op})$  ergibt. Alle Eigenvektoren  $\mathbf{h}_{op}$  erfüllen die Gleichung (12), wobei  $\Psi$  der entsprechende Eigenwert ist.

[0053] Die optimalen Filter, die gemäß den obigen Ausführungsformen gebildet werden, können eine große Trennung der mittleren lokalen Energieschätzungen  $\mu_{fd}$  und  $\mu_{fr}$  erreichen. Außerdem oder alternativ kann das optimale Filter so gebildet werden, dass es die Varianzen der lokalen Energieschätzungen  $F(x, y)$  berücksichtigt. Das so gebildete optimale Filter kann zumindest irgendeine mögliche Überlappung der Merkmalsverteilung minimieren, selbst wenn die Varianzen der lokalen Energieschätzung  $\sigma_{fd}$  und  $\sigma_{fr}$  groß sind. In einer beispielhaften Ausführungsform kann das optimale Filter so gebildet werden, dass es nicht nur eine große Trennung der mittleren lokalen Energieschätzung erzeugen kann, sondern auch niedrige Varianzen  $\sigma_{fd}$  und  $\sigma_{fr}$  ergeben kann. Eine Objektfunktion, die üblicherweise in der Mustererkennungsliteratur verwendet wird, ist beispielsweise das Fisher-Kriterium. Das Fisher-Kriterium berücksichtigt die Varianzen der Merkmalsverteilungen.

$$J_3(\mathbf{h}_{op}) = \frac{(\mu_{fd} - \mu_{fr})^2}{\sigma_{fd}^2 + \sigma_{fr}^2} \quad (13)$$

[0054] Eine ungefähre Lösung in geschlossener Form zum Berechnen von optimalen Filtern auf der Basis der Fisher-Kriterienfunktion kann bei der Fehlersegmentierung verwendet werden. Durch Nähern der Gewebetextur als autoregressive Felder der Ordnung Eins kann ein vereinfachter Ausdruck für die Varianz und ihre Ableitung erhalten werden. Die Optimierung kann auf die folgende Eigenwertgleichung reduziert werden:

$$(\mathbf{R}_{ii_r}^{-1} \mathbf{R}_{ii_d}) \mathbf{h}_{op} = \frac{(\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_d} \mathbf{h}_{op})}{(\mathbf{h}_{op}^T \mathbf{R}_{ii_r} \mathbf{h}_{op})} \mathbf{h}_{op} \quad (14)$$

[0055] Die Koeffizienten des optimalen Filters können aus dem Eigenvektor  $\mathbf{h}_{op}$ , der den maximalen Wert der Objektfunktion  $J_3(\mathbf{h}_{op})$  ergibt, berechnet werden.

[0056] Gemäß der vorliegenden Erfindung kann ein optimales Filter gebildet werden, indem z. B. zuerst die Korrelationsmatrizes  $\mathbf{R}_{ir}$  und  $\mathbf{R}_{id}$  aus Gewebeproben und den Eigenvektoren von  $(\mathbf{R}_{ir}^{-1}, \mathbf{R}_{id})$  erhalten werden. Dann kann der Eigenvektor, der die maximale Objektfunktion ergibt, wie z. B.  $J_1(\mathbf{h}_{op})$  oder  $J_2(\mathbf{h}_{op})$  oder  $J_3(\mathbf{h}_{op})$ , ausgewählt werden. Das optimale Filter  $\mathbf{h}_{op}(x, y)$  kann aus Elementen von  $\mathbf{h}_{op}$  erhalten werden, wie z. B. durch Invertieren der lexikographischen Umordnung. Es ist zu erkennen, dass andere Merkmalsextraktionsmodelle zum Bilden von optimalen Filtern auch innerhalb des Schutzbereichs der vorliegenden Erfindung liegen.

## 2. Überwachte Fehlererfassung

**[0057]** In den meisten industriellen Untersuchungssystemen steht eine Vorkenntnis von zu erfassenden Fehlern zur Verfügung. Die Untersuchung von solchen bekannten Fehlern kann als überwachte Fehlererfassung betrachtet werden. Die folgenden Ausführungsformen beschreiben eine solche überwachte Fehlererfassung unter Verwendung von optimalen Filtern, die dazu ausgelegt sind, bekannte Kategorien von Fehlern in Bahnmaterialien zu erfassen.

## 2.1. Größe des optimalen Filters

**[0058]** Die Abmessung eines FIR-Filters kann auf der Basis einer Vielzahl von Faktoren bestimmt werden. Die Abmessung eines FIR-Filters kann beispielsweise auf der Basis seiner Bandbreite bestimmt werden. Im Allgemeinen weisen Filter mit einer großen Bandbreite eine kleinere Abmessung auf als Filter mit einer kleinen Bandbreite.

**[0059]** Außerdem oder alternativ kann die Abmessung eines optimalen Filters auf der Basis der Spektraleigenschaften eines Gewebebildes wie z. B. Garndichte und Webmuster bestimmt werden. Wenn das Gewebematerial beispielsweise ein Leinwandbindungsgewebe mit einer hohen Garndichte ist, dann werden die Bildpixel des Gewebes schnell unkorreliert. Folglich kann das Spektrum von solchem Gewebe wahrscheinlich einen hohen Frequenzgehalt aufweisen, der eine große Bandbreite oder ein räumliches Filter mit kleiner Abmessung erfordert. Alternativ können Filter mit großer räumlicher Abmessung bei einem Gewebematerial mit einer niedrigeren Garndichte verwendet werden. Da ein symmetrischer Trägerbereich für eine genaue Kantenlokalisierung verwendet wird, werden nachstehend daher nur Filtermasken mit ungerader Größe beschrieben.

## 2.2. Auswahl des Glättungsfilters

**[0060]** Ein optimales Filter der vorliegenden Erfindung kann ein Glättungsfiler umfassen. Das Glättungsfiler ist in der Lage, Bereiche mit hoher lokaler Bandpassenergie in starke Graustufenverteilungen zu transformieren. In einer beispielhaften Ausführungsform wird ein Gaußsches Tiefpass-Glättungsfiler verwendet. Ein solches Gaußsches Tiefpass-Glättungsfiler ist trennbar und in der Lage, eine optimale Gesamtauflösung in der räumlichen Frequenz und im räumlichen Bereich zu bieten.

$$g(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda}} e^{-((1/2)(x^2 + y^2)/\lambda^2)} \quad (15)$$

**[0061]** Die Wahl der Bandbreite  $\lambda$  kann die für die lokale Energieschätzung am Ausgang einzuschließenden Frequenzen bestimmen. Eine endliche Näherung des Filters von obiger Gleichung (15), das als trennbare Faltungsmasken implementiert wird, kann als Glättungsfiler verwendet werden. In einer Ausführungsform kann die Bandbreite  $\lambda$

$$\lambda = \frac{1}{2\sqrt{2}f_0} \quad (16)$$

sein. Die Mittenfrequenz  $f_0$  kann z. B. durch die Anzahl von Pixeln, die von einem Garn in einem Bild belegt sind, bestimmt werden. In allen Twillgewebeproben, die in dieser Anmeldung beschrieben sind, belegt ein Garn beispielsweise ungefähr 8 Pixel. Folglich ist die Mittenfrequenz  $f_0 = 1/8$ . Wenn das Bild nahe der Bildgrenze gefiltert wird, nehmen wir an, dass das Bild durch sein Spiegelbild erweitert wird, d. h. gerade Reflexionen.

## 2.3 Experimentelle Ergebnisse

**[0062]** Die vorliegende Erfindung ist auf verschiedene Bahnmaterialien anwendbar, wie z. B. Textil, Papier, Kunststoff, Holz und Metall. In einer Ausführungsform können die verwendeten Proben Twill oder glatte Gewebematerialien sein, die von Webstühlen zusammengetragen werden. Solche Probenmaterialien können die üblichsten Gewebefehler enthalten, wie z. B. verwechselter Schuss, Schussfehler, körniger Schuss, Rietenzugfehler, falsche Streckung, gefärbtes Garn, gebrochenes Ende, schmutziges Ende, Doppelschuss, große Noppe, gebrochenes Garn, Dreifachkettfaden usw.

**[0063]** Bilder der Probengewebematerialien können in verschiedenen Weisen erhalten werden. In einer Aus-

führungsform können alle Bilder unter einer Hintergrundbeleuchtungsbedingung aufgenommen werden. Außerdem oder alternativ können die Bilder einen Bereich von etwa  $1,28 \times 1,28 \text{ Inch}^2$  des Probengewebematerials bedecken. Die aufgenommenen Bilder können dann, wie z. B. in  $256 \times 256$  Pixel, mit einer Acht-Bit-Auflösung (d. h. 256 Graustufen) digitalisiert werden. Diese aufgenommenen Bilder können im Histogramm abgeglichen werden und dann zum Entwerfen von optimalen Filtern verwendet werden, wie nachstehend beschrieben. In einer beispielhaften Ausführungsform werden nichtrekursive Filter mit optimierter Energietrennung verwendet, um Fehler zu segmentieren. In einer bevorzugten Ausführungsform kann ein Gaußsches Tiefpassfilter, wie vorstehend beschrieben, zum Glätten verwendet werden.

**[0064]** Fig. 3(a) zeigt das Bild eines Probenwillgewebes mit einem Fehler wie z. B. einem Schussfehler. In einer Ausführungsform kann ein optimales  $7 \times 7$ -Filter mit der Objektfunktion  $J_1(h_{op})$  entworfen werden, um den Fehler zu segmentieren. Fig. 3(i) stellt mögliche Eigenwerte von Gleichung (9) dar. Der dem größten Eigenwert (4,4187) entsprechende Eigenvektor kann gewählt werden, um das optimale Filter zu bilden. Fig. 3(h) zeigt den Amplituden-Frequenz-Gang eines solchen optimalen Filters. Es ist zu sehen, dass der Frequenzgang Durchlassbereiche, wo die lokale Energieschätzung hoch ist (entsprechend dem Fehler), und anderswo Sperrbereiche aufweist.

**[0065]** Fig. 3(b) zeigt das Bild nach Filtern mit dem optimalen Filter. Wie aus dem Bild zu sehen ist, ist die Standardabweichung von einzelnen Pixeln, die einem Fehler entsprechen, viel höher als jene in einem fehlerfreien Bereich. Daher kann der Fehler durch eine beliebige lineare Zwei-Klassen-Unterscheidungsfunktion, wie z. B. Begrenzung durch Schwellenwerte, segmentiert werden. Der segmentierte Fehler und sein dreidimensionales Maschendiagramm sind in Fig. 3(e) bzw. Fig. 3(g) gezeigt.

**[0066]** Die lokale Energieschätzung für dieses Probenbild und sein dreidimensionales Maschendiagramm sind in Fig. 3(c) bzw. Fig. 3(f) gezeigt. Da die mittlere lokale Energie für den Fehlerbereich 4,4187 (aus Tabelle 2) mal jener eines fehlerfreien Bereichs ist, kann der Fehler leicht segmentiert werden, wie z. B. durch eine einfache Begrenzung durch Schwellenwerte (Fig. 3(d)). Die optimalen Filter sind robust (wie nachstehend im Abschnitt 3.3 beschrieben wird) und können Fehler ähnlicher Art, die sich an einem beliebigen Abschnitt des untersuchten Bildes befinden, erfolgreich erfassen. Es ist zu erkennen, dass weitere Ausführungsformen von optimalen Filtern auch innerhalb des Schutzbereichs der vorliegenden Erfindung liegen.

**[0067]** Fig. 4(a) zeigt das Bild einer Leinwandbindungs-Gewebeprobe mit einem Fehler wie z. B. falscher Streckung. In einer Ausführungsform können drei optimale  $5 \times 5$ -Filter mit Kriterienfunktionen  $J_1(h_{op})$ ,  $J_2(h_{op})$  und  $J_3(h_{op})$  dazu entworfen werden, den Fehler zu erfassen. Die Erfassungsergebnisse der drei optimalen Filter sind in Fig. 4(b), Fig. 4(c) bzw. Fig. 4(d) gezeigt, in denen alle drei optimalen Filter Fehler am Probengewebe erfolgreich erfassen können.

**[0068]** Fig. 4(e) und Fig. 4(m) zeigen Doppelbindungs-Gewebeprobe mit Fehlern, wie z. B. einem gefärbten Garn bzw. einem schmutzigen Garn. In einer Ausführungsform können diese Fehler unter Verwendung von optimalen  $7 \times 7$ -Filtern der vorliegenden Erfindung erfasst werden. Fig. 4(f) bis Fig. 4(h) zeigen die Ergebnisse für die Gewebeprobe, die ein gefärbtes Garn enthält, das durch optimale Filter untersucht wird, die mit  $J_1(h_{op})$ ,  $J_2(h_{op})$  bzw.  $J_3(h_{op})$  entworfen sind. Fig. 4(n) bis Fig. 4(p) zeigen die Ergebnisse für die Gewebeprobe, die ein schmutziges Garn enthält, das durch optimale Filter untersucht wird, die mit  $J_1(h_{op})$ ,  $J_2(h_{op})$  bzw.  $J_3(h_{op})$  entworfen sind.

**[0069]** In einer alternativen Ausführungsform von Fig. 4(i) wird eine weitere Diagonalbindungsgewebeprobe, die einen Fehler wie z. B. ein gebrochenes Ende enthält, erfasst. Fig. 4(i) und Fig. 4(k) zeigen die Erfassungsergebnisse, die durch optimale  $7 \times 7$ -Filter erhalten werden, die mit  $J_1(h_{op})$ , bzw.  $J_2(h_{op})$  entworfen sind. Fig. 4(l) zeigt das Ergebnis eines optimalen Filters mit der Objektfunktion  $J_3(h_{op})$  entsprechend dem Fisher-Kriterium. Wie in den obigen Ausführungsformen beschrieben, können eine oder alle drei Kriterienfunktionen  $J_1(h_{op})$ ,  $J_2(h_{op})$  und  $J_3(h_{op})$  verwendet werden, um optimale Filter zu entwerfen, um eine Vielfalt von Fehlern in Leinwandbindungs- und/oder Diagonalbindungsgeweben zu erfassen. Es ist zu erkennen, dass andere Ausführungsformen von optimalen Filtern auch innerhalb des Schutzbereichs der vorliegenden Erfindung liegen.

**[0070]** In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann das optimale Filter, das mit der Objektfunktion  $J_2(h_{op})$  entworfen ist, bevorzugte Ergebnisse ergeben, die durch eine einfache Begrenzung durch Schwellenwerte erfasst werden können. Zusätzliche experimentelle Ergebnisse, die durch ein optimales Filter mit der Objektfunktion  $J_2(h_{op})$  erhalten werden, sind in Fig. 5(a) bis Fig. 5(p) gezeigt. Fig. 5(a), Fig. 5(e), Fig. 5(i) und Fig. 5(m) zeigen die Bilder von Gewebeprobe, die einen Doppelschuss, eine große Noppe, ein gebrochenes Garn bzw. einen Dreifachkettfaden enthalten. Fig. 5(b), Fig. 5(f), Fig. 5(j) und Fig. 5(n) zeigen entsprechende

gefilterte Bilder mit dem optimalen Filter mit der Objektfunktion  $J_2(h_{op})$ . [Fig. 5\(c\)](#), [Fig. 5\(g\)](#), [Fig. 5\(k\)](#) und [Fig. 5\(o\)](#) zeigen entsprechende lokale Energieschätzungen. [Fig. 5\(d\)](#), [Fig. 5\(h\)](#), [Fig. 5\(l\)](#) und [Fig. 5\(p\)](#) zeigen segmentierte Fehler. Die minimale Maskengröße für jedes optimale Filter, das in den obigen Ausführungsformen verwendet wird und im Abschnitt 2.1 erörtert ist, ist in nachstehender Tabelle 1 gezeigt. Die vorliegende Erfindung kann angewendet werden, um andere Gewebefehler wie z. B. Dickstellen, Stuhflugh, Ölfleck zu erfassen.

Tabelle 1: Minimale Maskengröße, die für Gewebeproben erforderlich ist, die in den Experimenten verwendet werden

Maskengröße	5 x 5	7 x 7	9 x 9
Art der Gewebeprobe	Glatt	Twill	Glatt
Garndichte Kettfaden x Einschuss pro Inch	Hoch 136 x 72	Mittel 118 x 60	Niedrig 110 x 52
Figurennummer(n)	4(a), 5(a)	4(e), 4(i), 4(m), 5(e), 5(i)	5(m)

#### 2.4. Erörterung

**[0071]** Im Allgemeinen ist eine hohe räumliche Auflösung für eine genaue Bewahrung der Kanten erforderlich. Andererseits ist eine hohe Raumfrequenzauflösung für eine genaue Schätzung der lokalen Energie erforderlich. Da die räumliche Auflösung und die Raumfrequenzauflösung invers in Beziehung stehen, werden sowohl die genaue Kantenlokalisierung als auch die genaue lokale Energieschätzung bei der Bestimmung der Größe des Glättungsfilters berücksichtigt.

**[0072]** Die qualitative Analyse wird für die in der vorliegenden Erfindung erhaltenen Erfassungsergebnisse verwendet. Tabelle 1 listet die minimale Maskengröße auf, die in jedem der obigen Experimente verwendet wird, um die gegebene Kategorie von Fehlern mit einer "annehmbaren Leistung" zu erfassen. Quantitativ kann eine "annehmbare Leistung" bedeuten, dass der Prozentsatz von falsch klassifizierten Fehlerpixeln geringer ist als etwa 10% im durch Schwellenwerte begrenzten Endbild. In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann das Rauschen, das in den Erfassungsergebnissen von **Fig. 5** gezeigt ist, auf Null verringert werden, wenn die Maskengröße vergrößert wird, wie z. B. auf jene, die in Tabelle 1 gezeigt sind. In einer weiteren Ausführungsform können optimale Filter mit einer kleineren Größe verwendet werden, um Gewebeproben mit einer höheren Garndichte zu erfassen, und umgekehrt. Die Größe von Masken von optimalen Filtern, die erforderlich sind, um einen Fehler zu erfassen, kann von anderen Faktoren abhängen, wie z. B. den Spektraleigenschaften eines Fehlers und der für die Erfassung erforderlichen Genauigkeit.

**[0073]** Tabelle 2 zeigt die Amplitude der drei Objektfunktionen als Funktion der Maskengröße. Die zweite Spalte in dieser Tabelle zeigt die mittlere Energie von Pixeln in dem Fehlerbereich relativ zu jener eines fehlerfreien Bereichs im gefilterten Bild. Wenn die Maskengröße von  $3 \times 3$  auf  $5 \times 5$  ( $7 \times 7$ ) zunimmt, nimmt die Rechenzeit für die Filterung mit  $J_1(h_{op})$  um 77 (340)% zu, aber die Objektfunktion nimmt nur um 1 (114)% zu. Dieser Fehler kann auch durch eine  $3 \times 3$ -Maske ([Fig. 3\(a\)](#)) mit einem unwesentlichen Kompromiss für die Leistung erfasst werden.

Tabelle 2: Maximale Objektfunktion (für Schussfehler, wie in Fig. 3(a) gezeigt) als Funktion der Maskengröße

Maskengröße	$J_1(h_{op})$	$J_2(h_{op})$	$J_3(h_{op})$
3 x 3	1,4082	0,1183	0,4063
5 x 5	2,8315	1,1846	1,0283
7 x 7	4,4187	2,6450	0,9406
9 x 9	5,5855	3,7645	1,0117
11 x 11	6,6410	4,7916	1,0602
13 x 13	7,8826	6,0094	0,9269
15 x 15	8,8267	6,9399	1,1859
17 x 17	9,8922	7,9932	1,6401
19 x 19	10,8588	8,9509	1,3436

[0074] Fig. 6 zeigt, dass diese 3 x 3-Maske andere Schussfehler in derselben Richtung erfassen kann. In einer weiteren Ausführungsform kann die minimale Maskengröße, die für die Fehlererfassung verwendet wird, von der Art (Spektrum) der Fehler abhängen. Die Wahl des schwächsten Eigenvektors, der dem kleinsten Eigenwert (d. h. Objektfunktion) entspricht, kann beispielsweise eine inverse Lösung erzeugen, d. h. Graustufen in einem gefilterten Bild werden vom Maximum zum Minimum ausgetauscht.

[0075] In einer weiteren Ausführungsform werden Gewebeproben, die eine sorgfältige manuelle (visuelle) Prüfung für die Fehlererfassung erfordern, mit optimalen 7 x 7-Filtern getestet. Es ist bevorzugt, dass ein optimales Filter auf der Basis einer Objektfunktion  $J_3(h_{op})$  zum Erfassen solcher Fehler verwendet wird, da die Fisher-Kriterienfunktion auch Varianzen der extrahierten Merkmale berücksichtigt und erwartet wird, dass sie in vielen Fällen besser arbeitet.

### 3. Online-Fehlererfassung

[0076] Die industrielle Bahnuntersuchung in Produktionslinien erfordert eine kontinuierliche Verarbeitung von Bildern, die von einer Kamera unter Verwendung von Hintergrundbeleuchtung aufgenommen werden. Ein beliebiges Online-Untersuchungssystem muss in der Lage sein, Fehler, die in verschiedenen Orientierungen und Auflösungspegeln erscheinen, zu integrieren. Die gewünschte Prozedur muss für einen Bereich von zu untersuchenden Produkten robust, automatisch und flexibel sein. Die vorliegende Erfindung betrifft auch eine unüberwachte Fehlererfassung zum Untersuchen von Bahnmaterialien, die eine große Vielfalt von Fehlern enthalten.

[0077] Fig. 7 zeigt ein Bahnuntersuchungssystem gemäß der vorliegenden Erfindung, das optimale Filter umfasst, die gemäß der vorliegenden Erfindung entworfen sind. Der hier vorgeschlagene Algorithmus ist insofern ähnlich zu anderen Mustererkennungspatentparadigmen, als der Prozess in Trainings- und Testphasen unterteilt ist. Der Trainingsprozess ist offline und beinhaltet Berechnungen von optimalen Filtern aus Probenbildern mit Fehlern. Die Testphase ist ein Online-Prozess, in dem aufgenommene Bilder unter Verwendung der im Voraus berechneten optimalen Filter auf Fehler untersucht werden.

[0078] Wie in Fig. 7 gezeigt, stellen  $h_1 \dots h_n$  einen Satz von n minimalen optimalen Filtern dar, die zum Erfassen der verschiedenen Arten von Fehlern für eine annehmbare Leistung erforderlich sind. Die Gesamtzahl an Filtern kann auf der Basis von verschiedenen Faktoren bestimmt werden, wie z. B. des Bereichs von zu erfassenden Fehlern (Qualitätssicherung) und der verfügbaren Rechenkomplexität der Hardware. Für jede optimal gefilterte Ausgabe wird eine lokale Energieschätzung ( $E_1 \dots E_n$ ) erhalten, wie z. B. unter Verwendung des im Abschnitt 1.1 beschriebenen Prozesses.

#### 3.1. Datenverschmelzung

[0079] Ein Datenverschmelzungsmodul wird in der vorliegenden Erfindung verwendet, um nützliche Informationen von verschiedenen Kanälen, d. h.  $E_1 \dots E_n$ , zu integrieren. Das Bildverschmelzungsmodul ist in der Lage, Hintergrundpixel zu dämpfen und Pixel vom Fehler zu betonen. In einer Ausführungsform kann das Datenver-

schmelzungsmodul eine Vektoraddition von Komponentenbildern beinhalten. Alternativ kann eine Bernoulli-Kombinationsregel verwendet werden, um Bilder von verschiedenen Kanälen zu kombinieren. In einer weiteren Ausführungsform kann eine Bildverschmelzung zum Verringern von Fehlalarm durch Erhalten von Abstandsbildern  $d_j(x, y)$  vor ihrer Vektoraddition ausgeführt werden.

$$d_j(x, y) = \begin{cases} E_j(x, y) & ; |E_j(x, y) - v_j| \geq |\zeta \rho_j| \\ 0 & \text{Ansonsten} \end{cases} \quad (17)$$

[0080] In der obigen Gleichung werden  $v_j$  und  $\rho_j$  aus einer fehlerfreien Probe erhalten. In einer Ausführungsform können die lokalen Energieschätzungen von den optimalen Filtern für die fehlerfreien Proben vor der Online-Untersuchung erhalten werden. Der Mittelwert  $v_j$  und die Standardabweichungen  $\rho_j$  von jedem dieser Bilder werden verwendet, um Abstandsbilder  $d_j(x, y)$  zu erzeugen (Gleichung 17), deren Vektoraddition eine verschmolzene Bildausgabe erzeugen kann. Die Variable  $\zeta$  steuert die Empfindlichkeit. In einer Ausführungsform kann die Variable  $\zeta$  im Bereich zwischen Eins und Drei festgelegt sein.

### 3.2. Binarisierung

[0081] Die nächste Stufe ist die Begrenzung der verschmolzenen Bildausgabe durch Schwellenwerte, um ein Binärbild von Fehlern  $B(x, y)$  zu erzeugen. Ein Schwellenwert kann so ausgewählt werden, dass ein beliebiger Wert unter dieser Grenze als zu einer untersuchten regulären Textur gehörend betrachtet wird und ein beliebiger Wert über der Grenze von Fehlern beigetragen wird. Der Schwellenwert kann in verschiedenen Weisen bestimmt werden. In einer Ausführungsform kann der Schwellenwert durch Kalibrierung am Beginn des Betriebs erhalten werden. Eine fehlerfreie Probe wird beispielsweise verwendet, um eine verschmolzene Bildausgabe  $C_r(x, y)$  zu erzeugen. Der Schwellenwert  $\varphi_{th}$  kann folgendermaßen erhalten werden:

$$\varphi_{th} = \max_{x, y \in W} \{C_r(x, y)\}, \quad (18)$$

wobei 'W' ein im Bild  $C_r(x, y)$  zentriertes Fenster ist. Die Fenstergröße kann bestimmt werden, um Effekte von Randverzerrungen zu vermeiden. In einer beispielhaften Ausführungsform kann die Fenstergröße 20 Pixel von jeder Seite des Bildes  $C_r(x, y)$  entfernt sein. Es ist zu erkennen, dass andere Ausführungsformen zum Erhalten eines Schwellenwerts auch innerhalb des Schutzbereichs der vorliegenden Erfindung liegen.

### 3.3. Kettfaden-Einschuss-Filtermodell

[0082] In einer beispielhaften Ausführungsform kann der Online-Fehlererfassungsalgorithmus unter Verwendung von Gewebeprobe ausgewertet werden, die von Textilwebstühlen zusammengetragen werden. Fehler an Textilbahnen werden gewöhnlich entweder in der horizontalen oder vertikalen Richtung aufgrund der Art des Webprozesses in Textilwebstühlen aufgefunden. Daher kann ein Kettfaden-Einschuss-Modell unter Verwendung von zwei optimalen Filtern entwickelt werden, um Fehler in der horizontalen (Einschuss) Richtung und der vertikalen (Kettfaden) Richtung zu erfassen, wie in [Fig. 8](#) gezeigt. In einer Ausführungsform werden die optimalen Filter mit einer Objektfunktion  $J_2(h_{op})$  entworfen. Eine  $7 \times 7$ -Maske  $h_1$  eines optimalen Filters kann entworfen werden, um den Gewebefehler zu erfassen, wie in [Fig. 9\(a\)](#) gezeigt. Die lokale Energieschätzung des gefilterten Bildes ist in [Fig. 9\(c\)](#) gezeigt.

[0083] In einer alternativen Ausführungsform kann eine andere Gewebeprobe mit einem Fehler in der vertikalen Richtung (z. B. [Fig. 3\(a\)](#)) gewählt werden. Ein optimales  $7 \times 7$ -Filter  $h_2$  kann ähnlich jenem im Abschnitt 2.3 entworfen werden, um den Fehler zu segmentieren. Das Datenverschmelzungsmodul, das eine einfache Vektoraddition von lokalen Energieschätzungen ( $E_1 \dots E_n$ ) verwendet, kann bei der Auflösung der verwendeten Bilder angemessen sein. Die Schwellenwertgrenze  $\varphi_{th}$  kann erhalten werden, wie in Gleichung (17) beschrieben.

### 3.4. Experimentelle Einrichtung und Ergebnisse

[0084] Die vorliegende Erfindung ist zum Untersuchen von Bahnmaterialien, die die üblichsten Gewebefehler enthalten, wie z. B. verwechselter Schuss, Schussfehler, körniger Schuss, Rieteinzugfehler, falsche Streckung, gefärbtes Garn, gebrochenes Ende, schmutziges Ende, Doppelschuss, große Noppe, gebrochenes Garn, Dreifachkettfaden usw., anwendbar. Folglich hat sich das Kettfaden-Einschuss-Modell der vorliegenden Erfindung als robust erwiesen. Die folgenden Ausführungsformen stellen die Erfassungsergebnisse für Diagonal-

bindungs-Gewebeproben dar.

**[0085]** Fig. 10(a) zeigt eine Gewebeprobe, die Fehler, wie z. B. Schussfehler, in einer vertikalen Richtung enthält. In einer Ausführungsform kann ein Filter  $h_2$  verwendet werden, um zur Ausgabe beizutragen, die in Fig. 10(c) und Fig. 10(d) gezeigt ist. In einer weiteren Ausführungsform enthält eine Gewebeprobe Fehler, die in Fig. 11(a) gezeigt sind. In dieser Ausführungsform können zwei Filter  $h_1$  und  $h_2$  verwendet werden, deren Ergebnisse in Fig. 11(b) bzw. Fig. 11(c) gezeigt sind. In der in Fig. 12(b) und Fig. 12(c) gezeigten Ausführungsform erfassen die Filter  $h_1$  und  $h_2$  erfolgreich die Komponenten von Fehlern in den zwei Richtungen. Ebenso stellen Fig. 13(b) und Fig. 13(c) Komponenten von Gewebefehlern in Fig. 13(a) dar. **Fig. 14** zeigt ein weiteres Beispiel der Robustheit von zwei Filtern zum Erfassen von Fehlern in zwei Richtungen. Die Komponenten in diesem Fehler, schlaffer Faden, sind in der horizontalen und vertikalen Richtung gleichmäßig verteilt. Die jeweiligen Komponenten werden aufgenommen und sind in Fig. 14(b) bzw. Fig. 14(c) gezeigt. Fig. 14(e) zeigt den segmentierten Fehler.

**[0086]** Die vorliegende Erfindung schafft ein neues Bahnuntersuchungssystem auf der Basis von optimalen Filtern. Auf der Basis einer hohen Leistung, gekoppelt mit geringen Rechenanforderungen, können optimale Filter eine Lösung mit niedrigen Kosten für industrielle Untersuchungsprobleme ergeben. Die kommerziellen Anwendungen der vorliegenden Erfindung können die Qualitätssicherung gewährleisten, was wiederum den Wirkungsgrad von Produktionslinien erhöht. Die optimalen Filter der vorliegenden Erfindung können auch zum Verbessern von existierenden Untersuchungssystemen auf der Basis von anderen Verfahren verwendet werden, denen es misslingt, eine Klasse von speziellen Fehlern zu erfassen. Viele der existierenden Untersuchungssysteme auf der Basis des Standes der Technik bieten eine sehr niedrige Erfassungsrate für Fehler, die sehr feine Intensitätsübergänge erzeugen. In solchen Fällen kann die vorliegende Erfindung auf der Basis von optimalen Filtern ergänzt werden, um diese Fehler zu erfassen.

**[0087]** Es ist zu erkennen, dass die hierin beschriebenen verschiedenen Merkmale einzeln oder in einer beliebigen Kombination davon verwendet werden können. Folglich ist die vorliegende Erfindung nicht auf nur die speziell hierin beschriebenen Ausführungsformen begrenzt. Obwohl die vorangehende Beschreibung und die Zeichnungen eine bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung darstellen, ist es selbstverständlich, dass verschiedene Zusätze, Modifikationen und Substitutionen darin vorgenommen werden können, ohne vom Schutzbereich der vorliegenden Erfindung, wie in den begleitenden Ansprüchen definiert, abzuweichen. Insbesondere ist es für Fachleute klar, dass die vorliegende Erfindung in anderen speziellen Formen, Strukturen und Anordnungen und mit anderen Elementen und Komponenten verkörpert werden kann, ohne vom Gedanken oder von den wesentlichen Eigenschaften davon abzuweichen. Ein Fachmann wird erkennen, dass die Erfindung mit vielen Modifikationen der Struktur, Anordnung und der Komponenten verwendet werden kann und ansonsten in der Praxis der Erfindung verwendet werden kann, die speziell an spezielle Umgebungen und Betriebsanforderungen angepasst sind, ohne von den Prinzipien der vorliegenden Erfindung abzuweichen. Die gerade offenbarte Ausführungsform ist daher in jeglicher Hinsicht als Erläuterung und nicht als Einschränkung zu betrachten, wobei der Schutzbereich der Erfindung durch die beigefügten Ansprüche angegeben ist und nicht auf die vorangehende Beschreibung begrenzt ist.

**[0088]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur automatischen Fehlererfassung in texturierten Materialien. Die vorliegende Erfindung verwendet lineare nichtrekursive (FIR) Filter mit optimierter Energietrennung. Insbesondere schafft die Erfindung ein Verfahren zum Untersuchen von Industrieprodukten auf Fehler. Das Verfahren besitzt die Schritte des automatischen Entwurfs von optimierten Filtern aus Proben von Produkten, des Verwendens dieser optimalen Filter, um die aufgenommenen Bilder des untersuchten Produkts zu filtern, des Berechnens der Energie jedes Pixels in einem lokalen Bereich und schließlich des Segmentierens des Fehlers durch Begrenzen jedes Pixels durch Schwellenwerte. Die vorliegende Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Untersuchung von unbekanntem (unüberwachten) Fehlern in Bahnmaterialien. Bei einer unüberwachten Untersuchung werden Informationen von einer endlichen Anzahl von optimalen Filtern unter Verwendung eines Datenverschmelzungsmoduls kombiniert. Dieses Modul versucht, den Fehlalarm, der den Informationen zugeordnet ist, die von verschiedenen Kanälen ankommen, aufzuheben.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Untersuchen eines Bahnmaterials, das Fehler enthalten kann, wobei das Verfahren umfasst:

Aufnehmen eines Bildes des Bahnmaterials, wobei das aufgenommene Bild mehrere Pixel enthält;  
Verarbeiten der Pixel, um Fehler zu identifizieren und um die identifizierten Fehler zu segmentieren;  
gekennzeichnet durch die folgenden Schritte für die Verarbeitung der Pixel:

- a) Dämpfen der Pixel in dem aufgenommenen Bild mit einem Filter unter Verwendung der Werte der Pixel in einem fehlerfreien Bereich des untersuchten Bahnmaterials, der ein Teil des aufgenommenen Bildes ist;  
 b) Erhalten der Energie jedes der gedämpften Pixel, um Fehler zu identifizieren.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem eine nichtlineare Funktion verwendet wird, um die Energie für jedes Pixel zu erhalten.

3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem die nichtlineare Funktion das Quadrieren und Absolutsetzen jedes gefilterten Pixels ist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, das ferner das Erhalten einer lokalen Energieschätzung für jedes Pixel in einem lokalen Bereich umfasst:

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem ein Glättungsfilter verwendet wird, um die lokale Energieschätzung jedes Pixels in einem lokalen Bereich um das Pixel zu berechnen.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem die aufgenommenen Bilder durch Schwellenwerte begrenzt werden, um die Fehler zu segmentieren.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, das ferner das Extrahieren von Frequenzen aus dem aufgenommenen Bild, die die Energie eines lokalen Fehlerbereichs von einem lokalen fehlerfreien Bereich unterscheidet, umfasst.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, das umfasst:  
 Verwenden mehrerer optimaler Filter zum Filtern unterschiedlicher Fehlerkategorien;  
 Kombinieren des Ausgangs von jedem der optimalen Filter in einem Datenverschmelzungsmodul, um ein verschmolzenes Ausgangsbild zu erhalten; und  
 Segmentieren von Fehlern in dem verschmolzenen Ausgangsbild.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem Fehler in dem verschmolzenen Ausgangsbild durch Schwellenwertbegrenzung segmentiert werden.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 oder 9, bei dem das Bahnmaterial ein gewebtes Material umfasst.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, bei dem zwei Filter für die horizontale bzw. die vertikale Richtung verwendet werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, bei dem das untersuchte Bahnmaterial aus der Gruppe ausgewählt ist, die aus Papier, Gewebe, Kunststoff, Holz und Stahl besteht.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, das umfasst:  
 Verwenden einer nichtlinearen Funktion, um die Energie des Pixels zu berechnen;  
 Verwenden eines Glättungsfilters, um die Energie jedes Pixel in einem lokalen Bereich zu berechnen; und  
 Begrenzen der aufgenommenen Bilder durch Schwellenwerte, um die Fehler zu segmentieren.

14. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das im Voraus entworfene optimale Filter eine optimale Objektfunktion folgender Form umfasst:

$$J_1(h_{op}) = \frac{\mu_{fd}}{\mu_{fr}} = \frac{h_{op}^T R_{iid} h_{op}}{h_{op}^T R_{iir} h_{op}}$$

wobei  $\mu_{fd}$  und  $\mu_{fr}$  die durchschnittliche lokale Energieschätzung für ein Gewebe mit Fehler bzw. ohne Fehler bezeichnen; wobei  $R_{ii} = E\{i(x, y)i^T(x, y)\}$  die  $L \times L$  ( $L = M \times N$ )-Korrelationsmatrix ist und aus der Autokorrelationsfunktion des Bildes  $i(x, y)$  konstruiert sein kann; wobei  $h_{op}$ ,  $h_{op}^T$  Vektoren oder Eigenvektoren mit einer Länge  $L = M \times N$  sind; und  $M \times N$  eine Matrix eines optimalen Filters ist.

15. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das im Voraus entworfene optimale Filter so entworfen ist, dass es die folgende Objektfunktion optimiert:

$$J_2(h_{op}) = \frac{(\mu_{fd} - \mu_{fr})^2}{\mu_{fd}\mu_{fr}}$$

wobei  $\mu_{fd}$  und  $\mu_{fr}$  die durchschnittliche lokale Energieschätzung für ein Gewebe mit Fehler bzw. ohne Fehler bezeichnen.

16. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das im Voraus entworfene optimale Filter so entworfen ist, dass es die folgende Objektivfunktion optimiert:

$$J_3(h_{op}) = \frac{(\mu_{fd} - \mu_{fr})^2}{\sigma_{fd}^2 + \sigma_{fr}^2}$$

wobei  $\mu_{fd}$  und  $\mu_{fr}$  die durchschnittliche lokale Energieschätzung für ein Gewebe mit Fehler bzw. ohne Fehler bezeichnen; und  $\sigma_{fd}$  und  $\sigma_{fr}$  Varianzen der lokalen Energieschätzung bezeichnen.

Es folgen 17 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

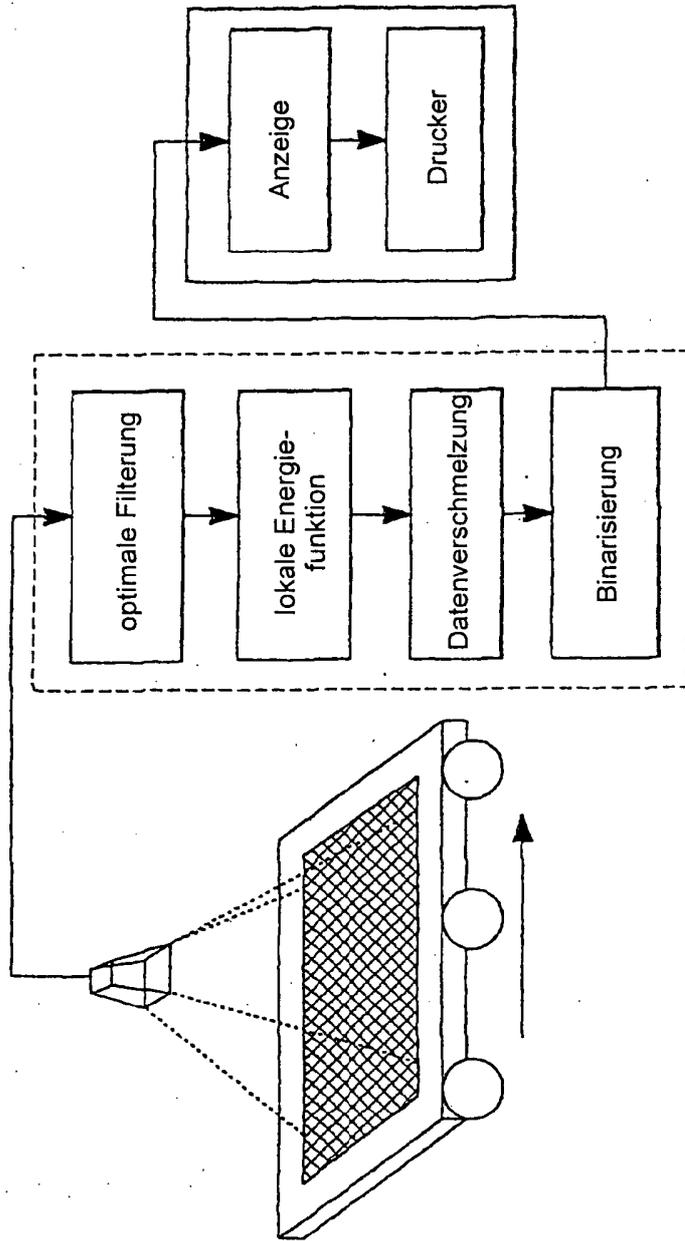


Fig. 1

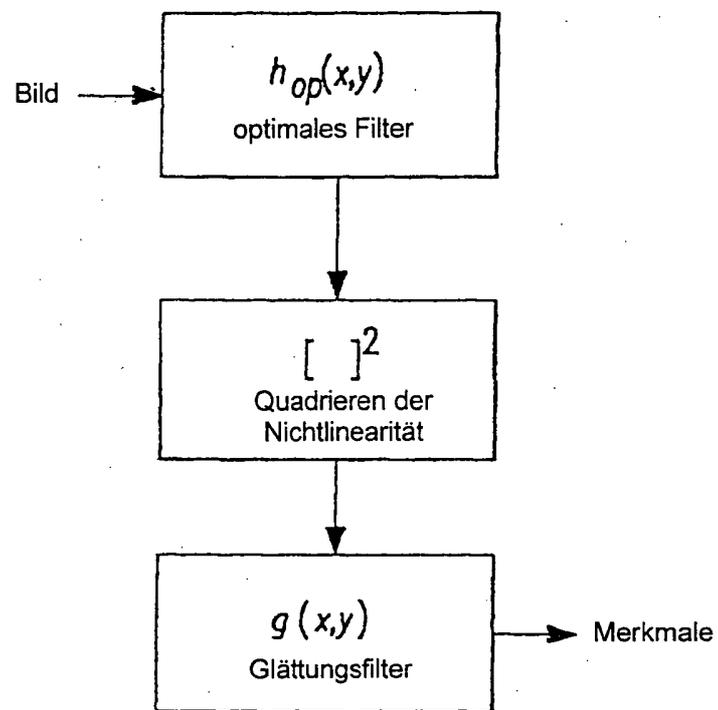


Fig. 2

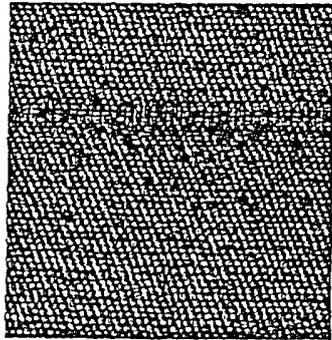


FIG.3(a)

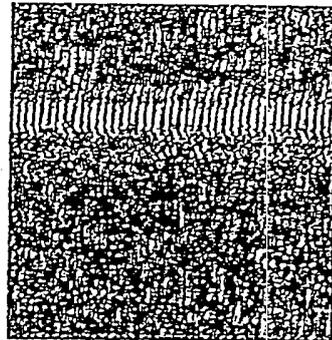


FIG.3(b)

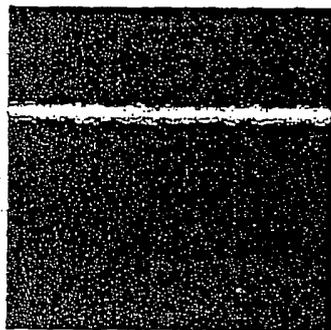


FIG.3(c)

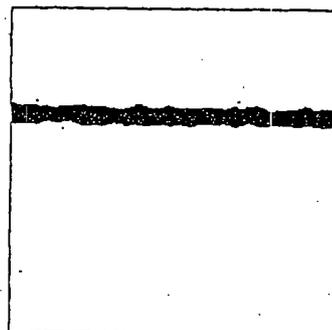


FIG.3(d)

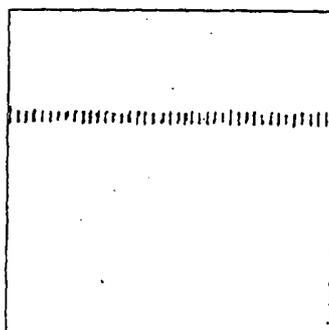


FIG.3(e)

Energie nach Filtern

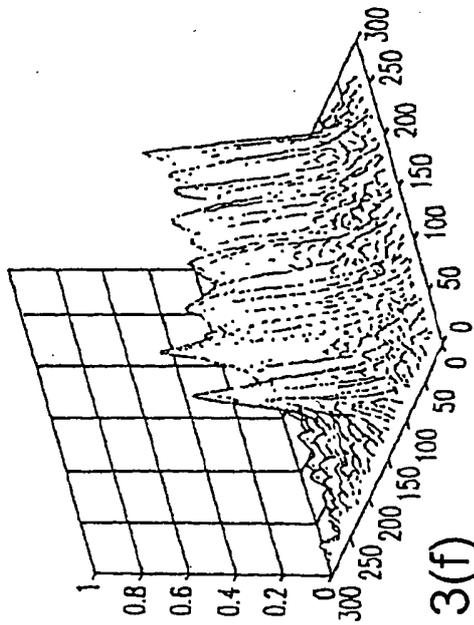


Fig. 3(f)

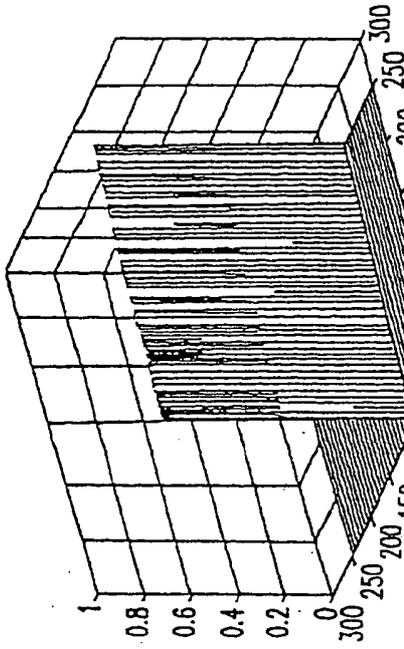


Fig. 3(g)

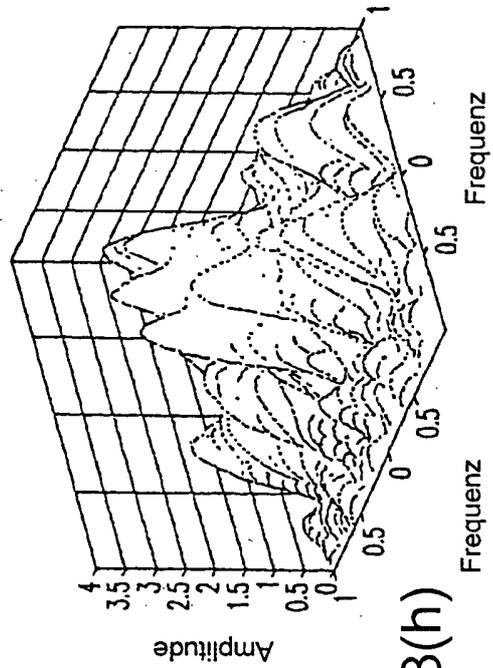


Fig. 3(h)

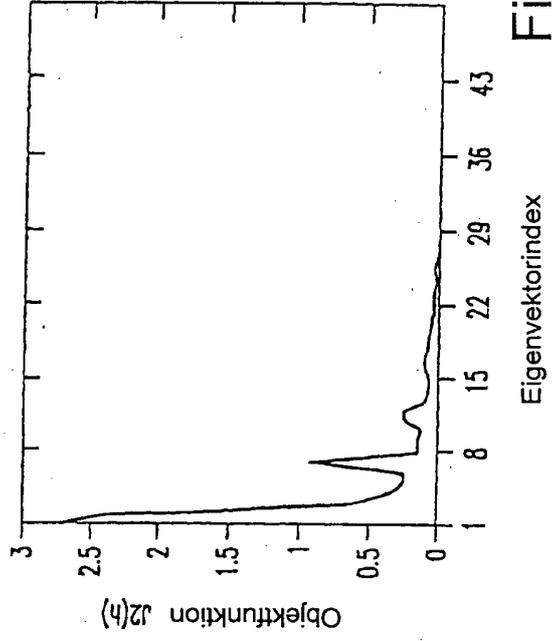


Fig. 3(i)



FIG. 4(d)

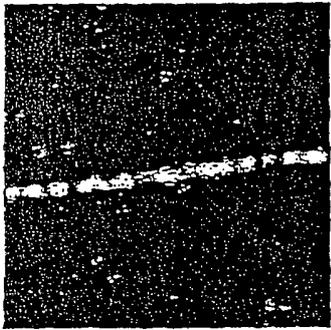


FIG. 4(c)

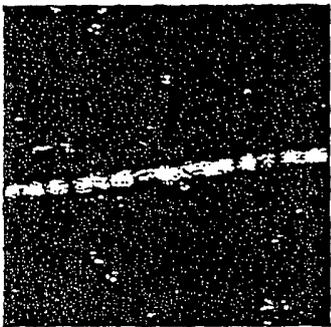


FIG. 4(b)

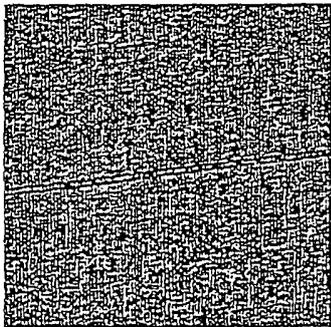


FIG. 4(a)

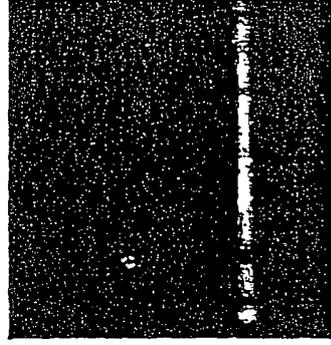


FIG. 4(h)

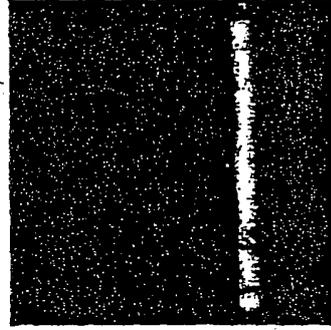


FIG. 4(g)

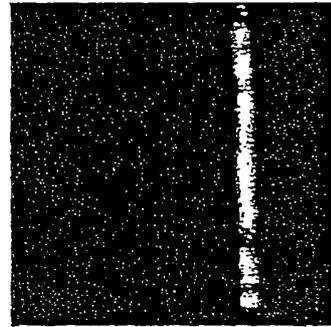


FIG. 4(f)

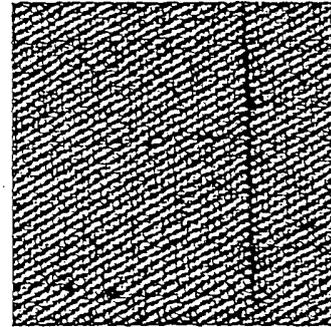


FIG. 4(e)

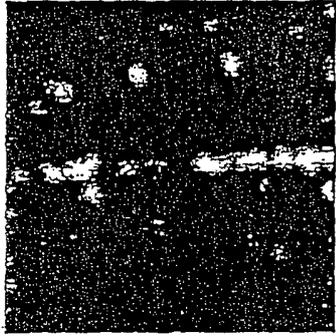


FIG. 4(l)

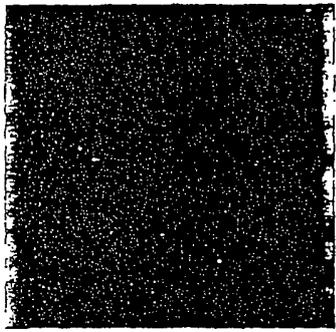


FIG. 4(k)

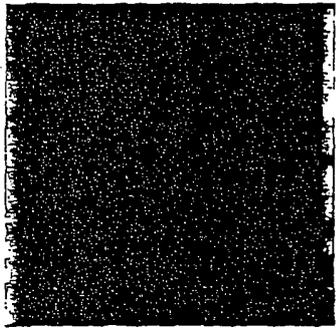


FIG. 4(j)

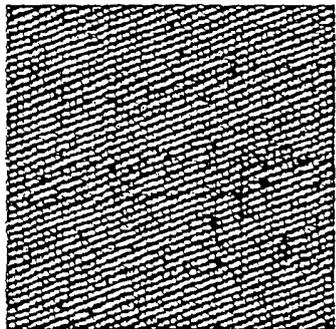


FIG. 4(i)



FIG. 4(p)

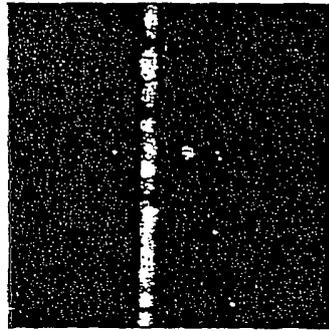


FIG. 4(o)

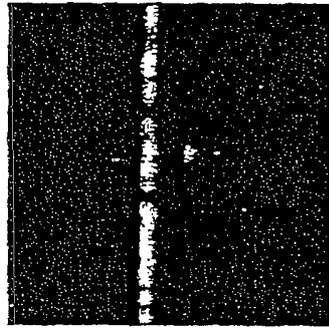


FIG. 4(n)

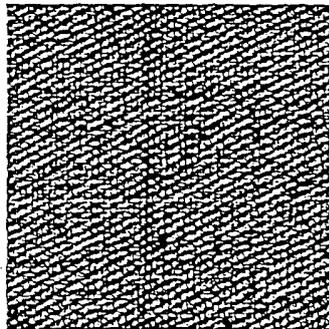


FIG. 4(m)

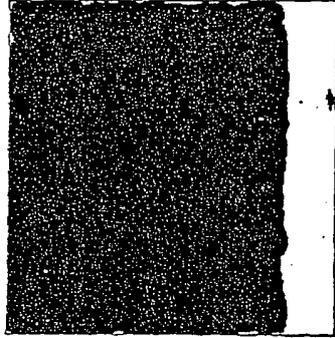


FIG. 5(d)



FIG. 5(c)

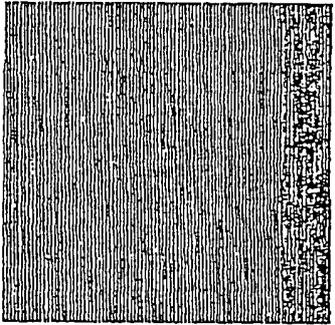


FIG. 5(b)

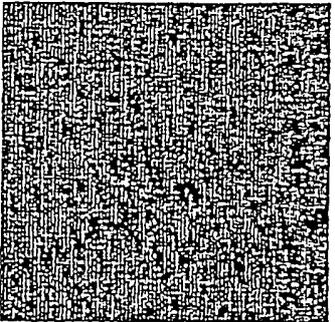


FIG. 5(a)

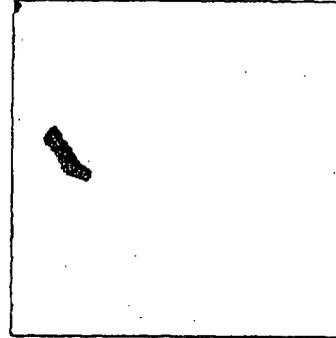


FIG. 5(h)

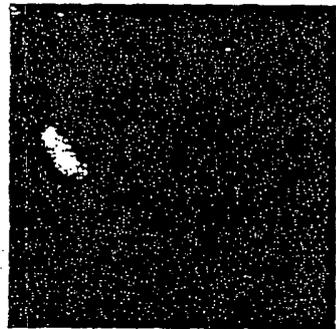


FIG. 5(g)

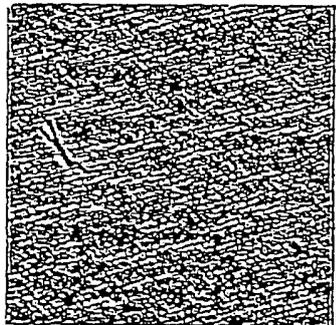


FIG. 5(f)

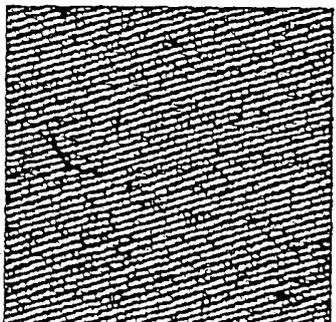


FIG. 5(e)

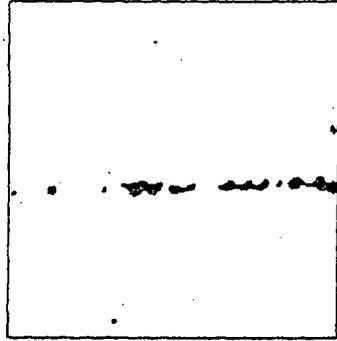


FIG. 5(l)

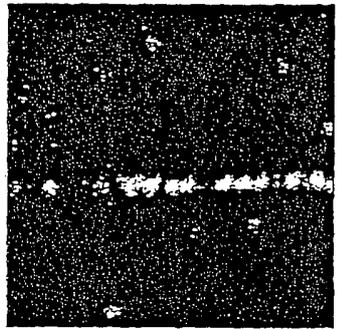


FIG. 5(k)

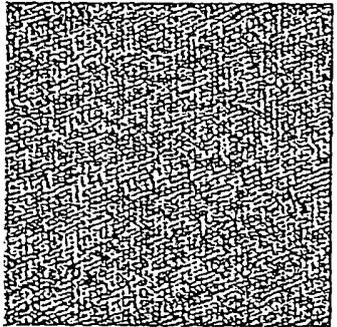


FIG. 5(j)

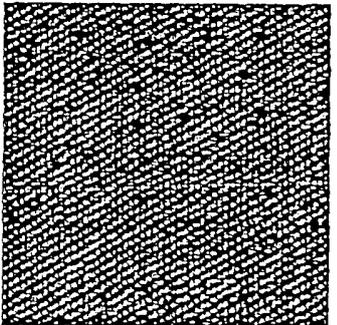


FIG. 5(i)

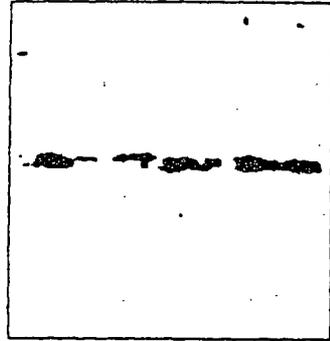


FIG. 5(p)

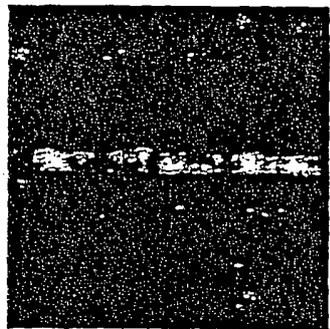


FIG. 5(o)

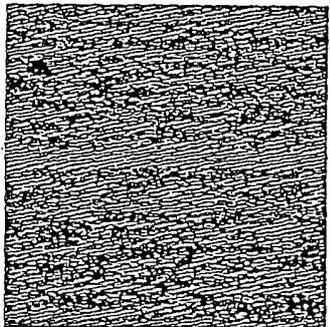


FIG. 5(n)

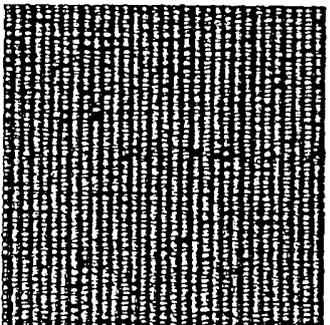


FIG. 5(m)

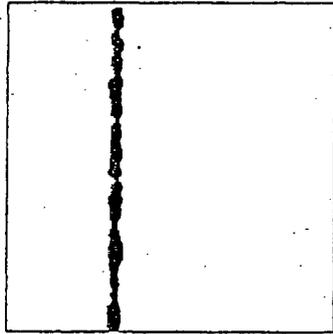


FIG. 6(c)

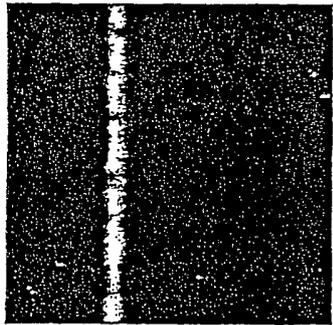


FIG. 6(b)

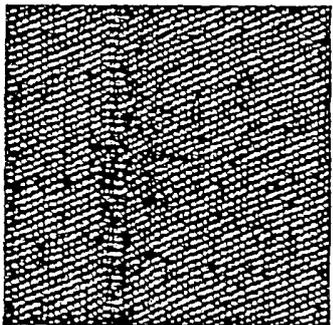


FIG. 6(a)

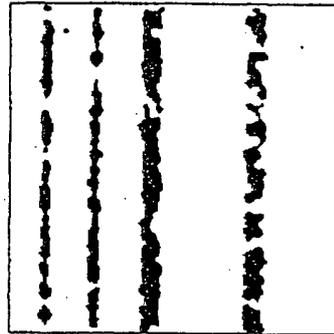


FIG. 6(f)

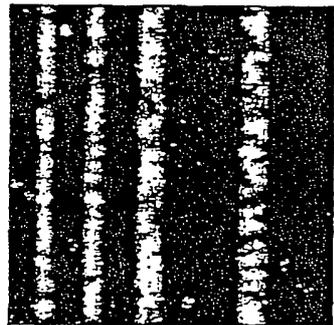


FIG. 6(e)

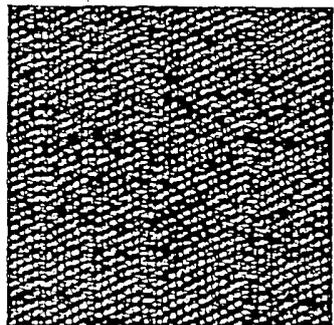


FIG. 6(d)

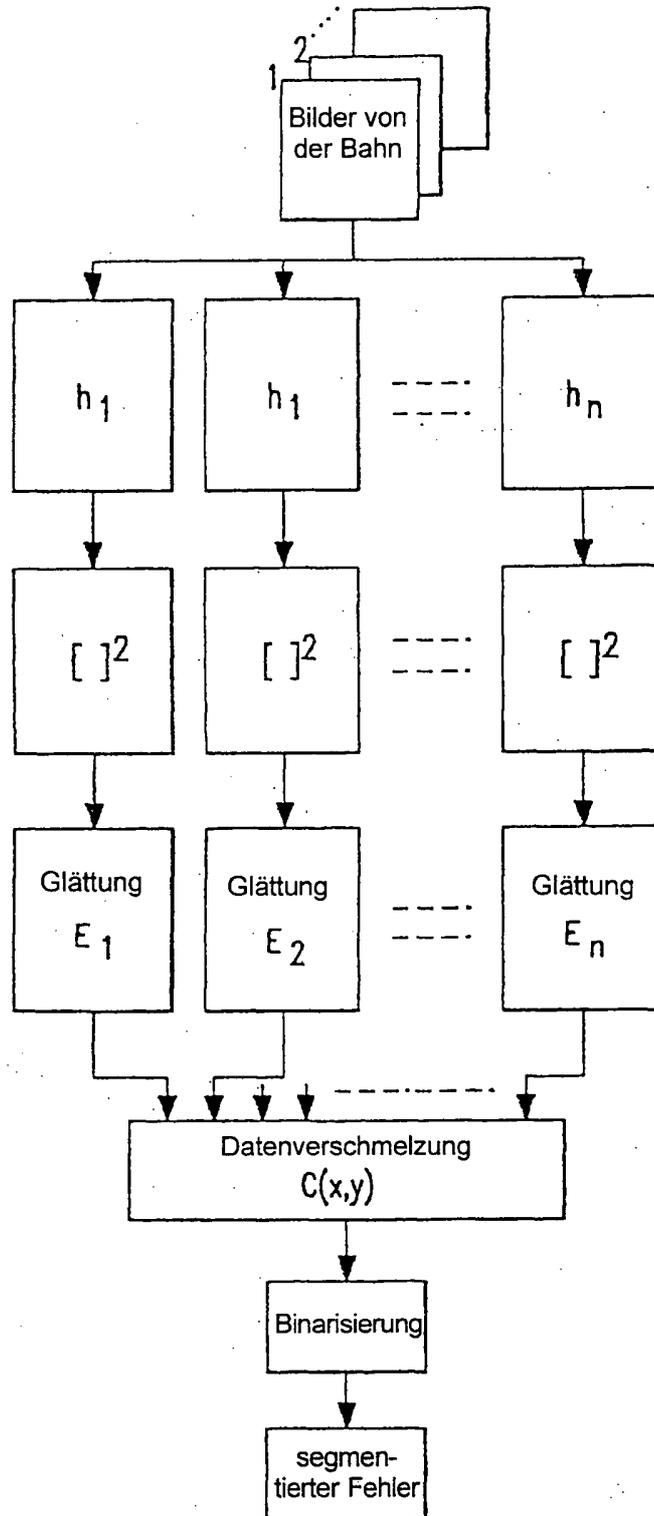


Fig. 7

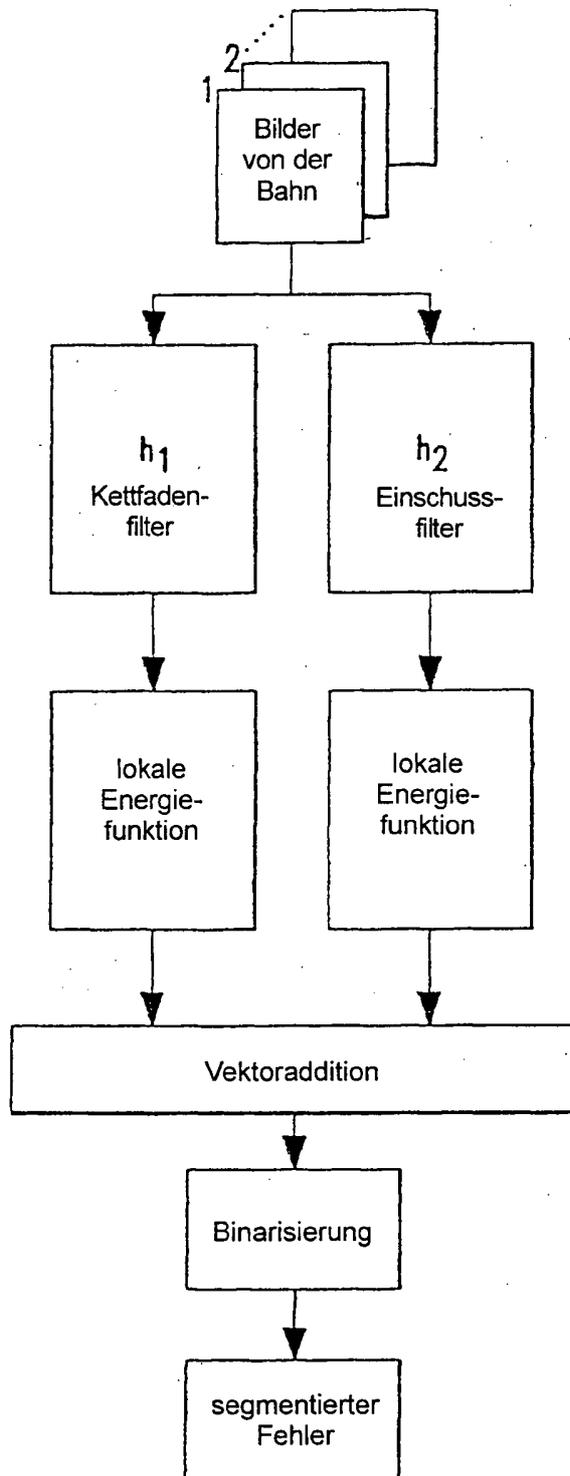


Fig. 8

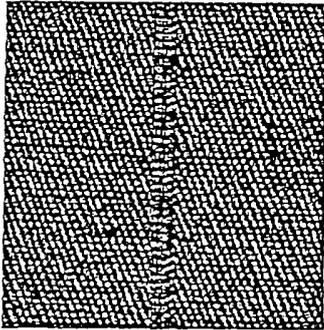


FIG.9(a)

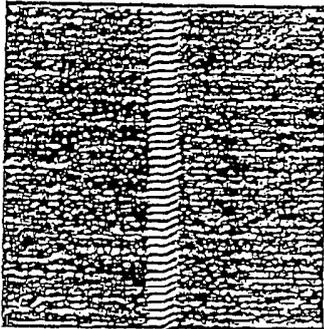


FIG.9(b)

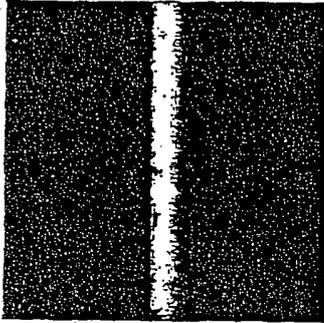


FIG.9(c)

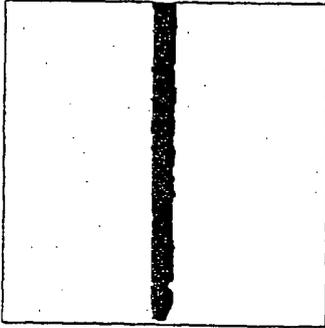


FIG.9(d)

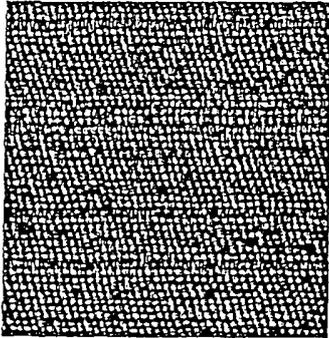


FIG.10(a)

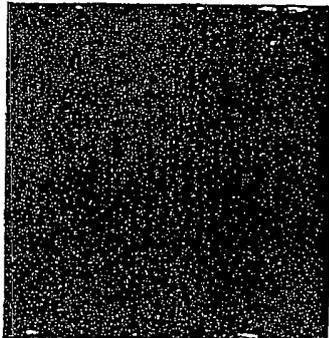


FIG.10(b)



FIG.10(c)

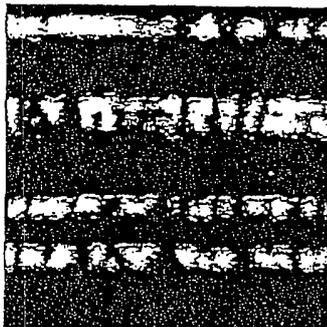


FIG.10(d)

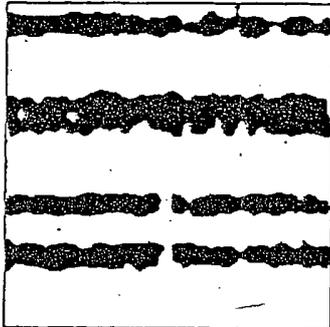


FIG.10(e)

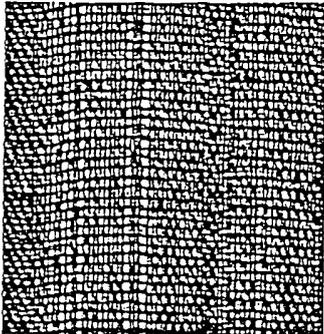


FIG.11(a)

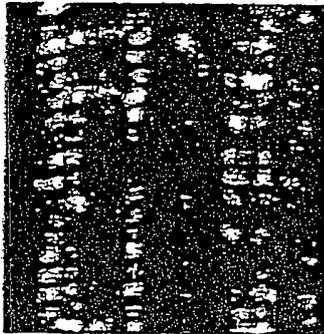


FIG.11(b)

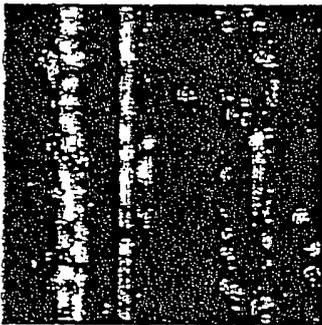


FIG.11(c)

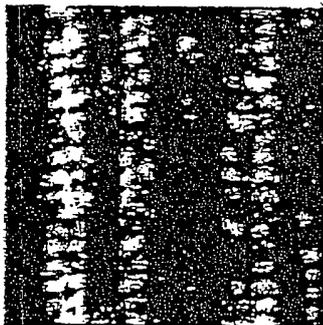


FIG.11(d)

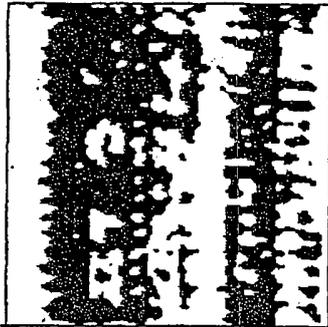


FIG.11(e)

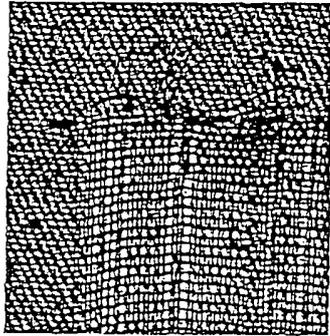


FIG.12(a)

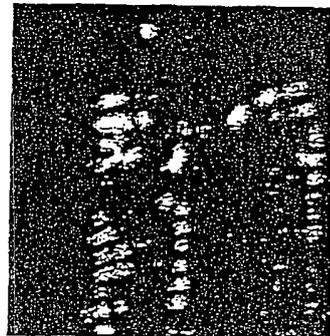


FIG.12(b)

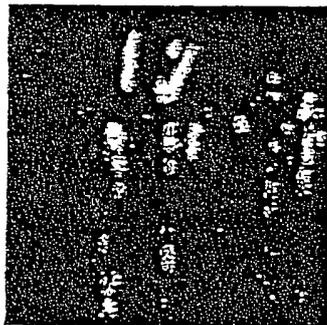


FIG.12(c)

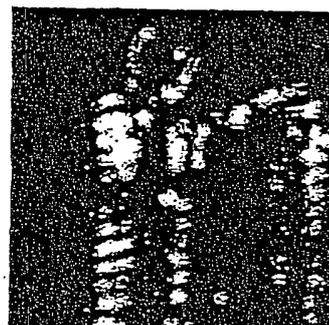


FIG.12(d)

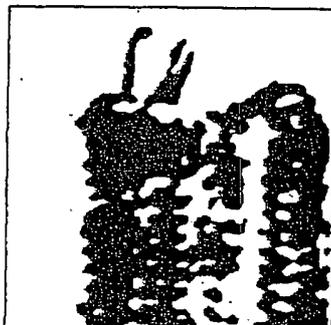


FIG.12(e)

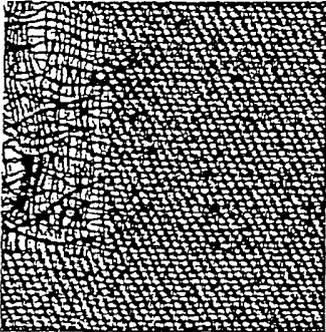


FIG.13(a)



FIG.13(b)

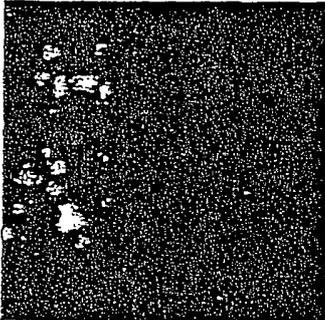


FIG.13(c)

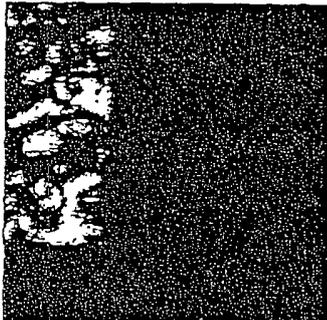


FIG.13(d)

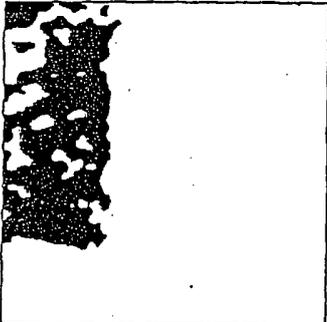


FIG.13(e)

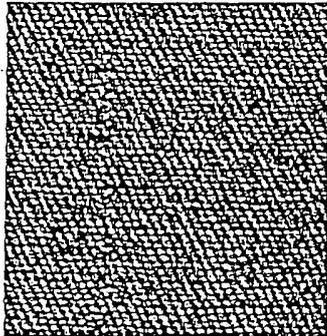


FIG. 14(a)

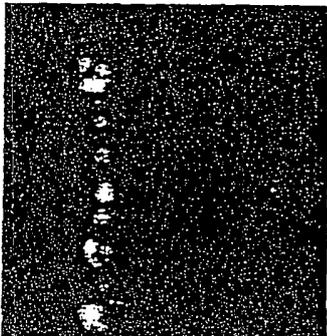


FIG. 14(b)

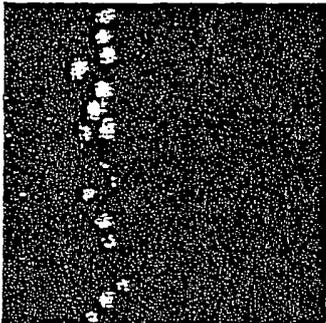


FIG. 14(c)

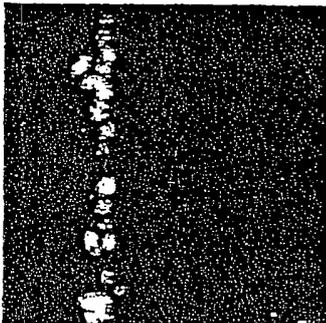


FIG. 14(d)

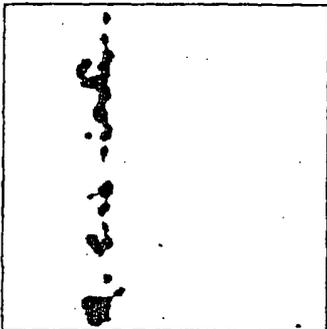


FIG. 14(e)