

# Modellgestützte automatische Sichtprüfung an Riefentexturen

Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Mesch zum 65. Geburtstag gewidmet

Fernando Puente León und Doris Krahe

**Schlagwörter:** Automatische Sichtprüfung, Bildverarbeitung, Texturanalyse, Riefentextur, Schußwaffenprojekteile, gehonte Oberflächen

*Ein wesentliches Problem in der automatischen Sichtprüfung texturierter Oberflächen besteht in der selektiven Reduktion der Bilddaten zur Gewinnung von Merkmalen, welche die interessierenden Informationen enthalten. Anhand von Riefentexturen wird gezeigt, wie die Verfügbarkeit eines signaltheoretischen Modells der Oberfläche verwendet werden kann, um gleichzeitig die Nutzinformation zu konzentrieren und Störungen zu unterdrücken, und daraus robuste, aussagekräftige Merkmale zu extrahieren. Mittels zweier praxisrelevanter Beispiele, dem Vergleich von Schußwaffenprojektilen für die Kriminaltechnik sowie der Detektion von Restdrehriefen an gehonten Oberflächen, wird die vorgestellte Methodik erläutert. Exemplarisch werden Möglichkeiten zur Ausführung der Signalverarbeitungsschritte diskutiert.*

## Model based automated visual inspection of groove surfaces

*An essential problem within automated visual inspection of textured surfaces deals with the selective reduction of the image data to obtain features which contain the interesting information. Based on groove textures, it is shown how the availability of a signal model of the surface can be used to concentrate the signal of interest and suppress noise simultaneously, and then extract robust, meaningful features. By means of two relevant examples, the forensic comparison of firearm bullets as well as the detection of turning grooves in honed surfaces, the presented methodology is explained, and possibilities of accomplishing the signal processing steps are exemplarily discussed.*

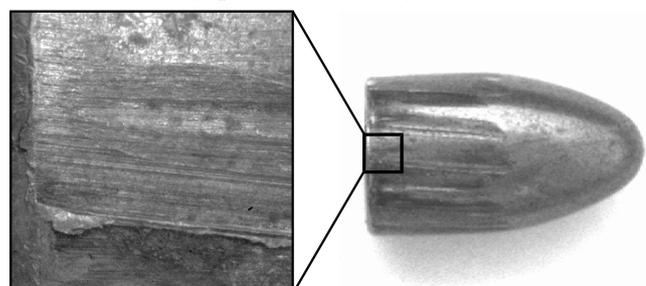
## 1 Einleitung

Die Wahl geeigneter Merkmale spielt eine entscheidende Rolle in der automatischen Sichtprüfung texturierter Oberflächen. In manchen Fällen kann diese Wahl von der Existenz eines signaltheoretischen Modells der betrachteten Textur profitieren, weil dieses eine effizien-

te Beschreibung der interessierenden Textureigenschaften ermöglicht. Modellgestützte Verfahren haben den wichtigen Vorteil, daß sie auf anschaulichere, problemangepasste Merkmale führen; ihr Einsatz wird dadurch aber in der Regel auf eine bestimmte Texturklasse beschränkt. Am Beispiel von Riefentexturen wird gezeigt, wie das Modellwissen sinnvoll in der Signalverarbeitung ausgenutzt werden kann. Die Vorteile der modellbasierten Vorgehensweise werden hier anhand zweier praxisrelevanter Beispiele erläutert.

Als erstes Beispiel für die vorgeschlagene modellgestützte Methodik wird eine kriminaltechnische Aufgabenstellung präsentiert: der automatische Vergleich relevanter Spuren an Projektilen zur Schußwaffenerkennung. Hierbei sind vor allem die Feinstrukturen auf Projektilmündern von Interesse, da sie als eine Art „Fingerabdruck“ der verfeuernden Waffe angesehen werden können; siehe Bild 1. Die bisherige Vorgehensweise ist weitgehend manuell und visuell: Ein Kriminaltechniker prägt sich mikroskopisch beobachtete Spuren in sein Gedächtnis ein, durchsucht dann ein unter Umständen sehr umfangreiches Archiv von Munitionsteilen und vergleicht es mit seiner Erinnerung. Da die aus diesem umständlichen und aufwendigen Archivvergleich entstehenden Wartezeiten für die Bearbeitung eines Falles mehrere Monate betragen kann, ist eine weitgehende Automatisierung des Spurenvergleichs erwünscht. Die Anforderungen für eine brauchbare technische Lösung umfassen eine automatische Bilderfassung, die Extraktion relevanter Individualmerkmale, die Verwaltung einer Bilddatenbank für die Tatmunitionssammlung, den automatischen Spurenvergleich von Munitionsteilen mit der

**Bild 1:** Verfeuerungsspuren an einem Projektil.



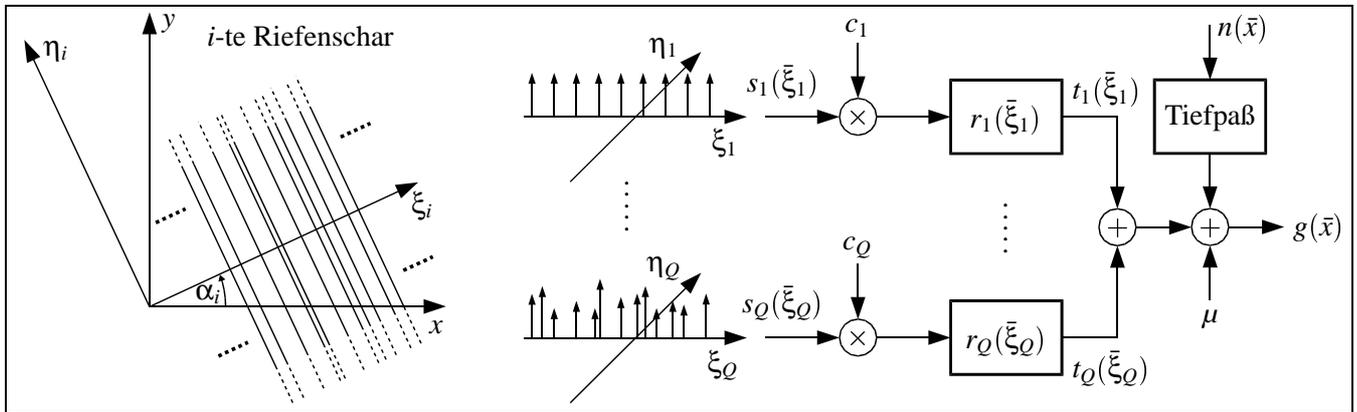


Bild 3: Signalmodell für Riefentexturen.

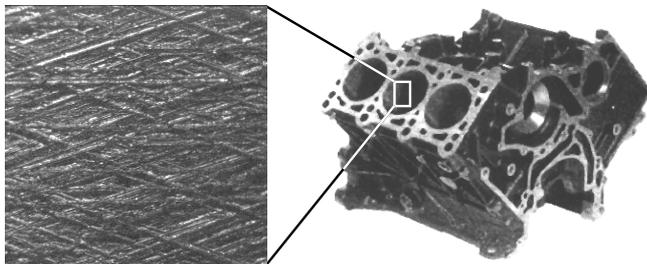


Bild 2: Hontextur mit Restdrehriefen.

Datenbank und die Erstellung einer „Hitliste“ von möglichen Spurenzusammenhängen. Im letzten Schritt sollen durch einen Sachbearbeiter die wahrscheinlichsten Kandidaten dieser Hitliste mit den vorliegenden Munitionsteilen visuell verglichen werden.

Die zweite Aufgabenstellung beschäftigt sich mit der Textur von Zylinderlaufflächen in Verbrennungsmotoren, die einen entscheidenden Einfluß auf Emissionsverhalten, Lebensdauer, Ölverbrauch und Notlaufeigenschaften hat. Bei Graugußmotorblöcken wird die Oberfläche nach dem Ausdrehen auf Maß gehont. Durch den Honprozeß wird eine Textur erzeugt, die aus zwei Riefenscharen besteht, die in einem bestimmten Winkel zueinander stehen. Die Existenz von Drehriefenresten in der Hontextur (vgl. Bild 2) deutet auf eine unzureichende Bearbeitung hin, weil sowohl die Maßhaltigkeit des Zylinders als auch die Funktionalität der Oberfläche nicht gewährleistet sind. Dies führt bei den aufwendigen, bisher durch Experten durchgeführten visuellen Qualitätskontrollen je nach Firmennorm oder Expertenmeinung zu einer starken Abwertung bis hin zur Ausmusterung [8]. Da der Fehler durch Nachhonen leicht behoben werden kann ist, ist eine sichere, schnelle und automatische Produktionsüberwachung erstrebenswert.

Im folgenden Kapitel wird ein Signalmodell angegeben, das die wesentlichen Eigenschaften von Riefentexturen mit wenigen Parametern beschreibt. Kapitel 3 stellt ein Schema zur Verarbeitung der Bilddaten unter Ausnutzung des verfügbaren Modellwissens vor. Schließlich wird in den Kapiteln 4 und 5 die präsentierte Vorgehensweise an jeweils einem Beispiel ausführlich erläutert.

## 2 Signalmodell

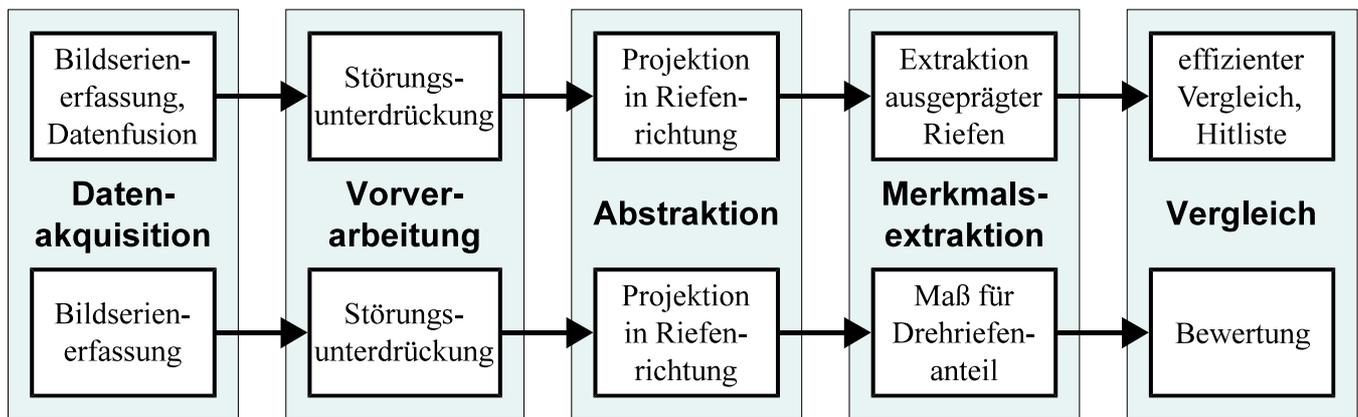
Zunächst sei angenommen, daß die Texturen der hier betrachteten Oberflächen ausschließlich gerade Riefen enthalten. Diese können entweder periodisch (beispielsweise bei Drehriefen) oder stochastisch (wie bei Honriefen und Projektilriefen) plaziert sein. In [2] wird ein Signalmodell für Riefentexturen vorgestellt, das u.a. diese Riefentypen beschreibt, siehe Bild 3.

Jede Riefe einer Textur kann als Antwort eines  $\delta$ -Impulses auf ein zweidimensionales lineares Filter mit der Impulsantwort  $r_i(\xi_i)$  betrachtet werden, wobei  $\xi_i = (\xi_i, \eta_i)^T$ . Der Impuls bestimmt dabei Lage und Amplitude der Riefe, während das Filter die in Riefenrichtung konstanten mittleren Profilwerte bzw. Grauwertintensitäten der Riefe modelliert.

Eine Schar  $i$  von geraden Riefen, die unter gleichem Winkel  $\alpha_i$  auftreten, wird durch einen aus einer Impulsfolge bestehenden Speiseprozeß  $s_i(\xi_i)$  erzeugt. Dabei wird für jede Riefenschar ein angepaßtes Koordinatensystem  $(\eta_i, \xi_i)$  benutzt. Eine Drehtextur wird beispielsweise durch äquidistante Impulse gleicher Amplitude erzeugt; die Speiseprozesse der beiden Riefenscharen einer Hontextur sowie von Projektilriefen entsprechen dagegen stochastisch plazierten Impulsen unterschiedlicher Amplitude.

Bei Texturen, die aus mehreren Riefenscharen bestehen, werden nach der Filterung mit  $r_i(\xi_i)$  die resultierenden Teiltexturen  $t_i(\xi_i)$  additiv überlagert, wobei die Gewichtungsfaktoren  $c_i$  ihre relative Ausprägung modellieren. Insbesondere besteht die interessierende Textur auf Projektilmänteln aus einer einzigen Schar gerader, stochastisch plazierter Riefen mit unterschiedlichen Amplituden. Hontexturen lassen sich durch zwei solche Riefenscharen modellieren, die den sogenannten Honwinkel  $\alpha_{HW}$  einschließen. Bei Vorhandensein von Restdrehriefen wird eine dritte Schar periodischer Riefen konstanter Amplitude hinzugefügt.

Schließlich wird noch ein tiefpaßgefiltertes Rauschen addiert, mit dem Störungen, Abweichungen vom mittleren Riefenprofil und vom idealen, linearen Texturmodell pauschal beschrieben werden, und ein Mittelwert  $\mu$ , der dem mittleren Grauwert des resultierenden Grauwertbildes  $g(\bar{x})$  mit  $\bar{x} = (x, y)^T$  entspricht.



**Bild 4:** Vorgehensweise bei der Bildauswertung: Vergleich von Spuren auf Projektilen (oben), Detektion von Restdrehriefen in gehonten Oberflächen (unten).

### 3 Vorgehensweise

Bild 4 zeigt die allgemeine Vorgehensweise zur Durchführung der Sichtprüfungsaufgabe. In der oberen Hälfte ist das Verarbeitungsschema zum Vergleich von Spuren auf Projektilen gezeigt; die untere Hälfte bezieht sich auf die Detektion von Restdrehriefen in gehonten Oberflächen.

Grundsätzlich können zur Inspektionsaufgabe sowohl Profildaten als auch Grauwertbilder verwendet werden. Für die hier vorgestellten Aufgabenstellungen wurde die Erfassung von Grauwertbildern bevorzugt, da sie den Vorteil der einfacheren visuellen Interpretation und der damit verbundenen höheren gerichtlichen Akzeptanz bietet – was bei der Schußwaffenerkennung von grundlegender Bedeutung ist. Im Falle der Detektion von Restdrehriefen sind vor allem die Kosten ausschlaggebend, die für eine Erfassungsstation von Profildaten erheblich höher wären. Die präsentierten Signalverarbeitungsverfahren eignen sich jedoch auch für die Verarbeitung von Tiefendaten.

Die Qualitätsanforderungen an die Datenakquisition sind: hohe Bildqualität (d.h. hoher Kontrast, hohe Auflösung und hohes Signal/Rausch-Verhältnis), reproduzierbare Aufnahmesituation und automatisierte Bilderfassung. Oftmals lassen sich all diese Anforderungen mit der Erfassung eines einzigen Bildes aufgrund der Beschränkungen optischer Systeme nicht erfüllen [10]. Teillösungen dieses Problems basieren auf der Erfassung von Bildserien unter Variation der Aufnahmeparameter und – falls das bei der zu untersuchenden Textur überhaupt sinnvoll ist – einer Fusion dieser Serie zu einem hochwertigen Fusionsresultat [10]. Insbesondere müssen Texturen, die aus einer Schar paralleler Riefen bestehen, mit parallelem Licht senkrecht zu den Riefen beleuchtet werden, um sie mit maximalem Kontrast zu erfassen [9]. Besteht eine Textur aus mehreren Riefenscharen, wie z.B. bei Hontexturen, so muß für jede Riefenschar ein eigenes Bild aufgenommen werden.

Im Vorverarbeitungsschritt werden beleuchtungsbedingte Texturinhomogenitäten unterdrückt, die im Signalmodell nicht berücksichtigt worden sind. Diese Ho-

mogenisierung führt zu einer Verbesserung der Bildqualität und einer Vereinfachung der nachfolgenden Schritte [3].

Die Abstraktion dient zur Datenreduktion unter Einbeziehung von A-priori-Wissen über die Signalentstehung. Bei den hier behandelten Riefentexturen stellen sämtliche Grauwertfluktuationen entlang von Riefen Störungen dar; vgl. Kapitel 2. Durch Projektion der Grauwerte entlang des Riefenverlaufs lassen sich diese Störungen weitgehend unterdrücken, was jedoch eine genaue Kenntnis des Riefenverlaufs voraussetzt.

Aus den Projektionsdaten werden anschließend Merkmale extrahiert, welche die für die Bildauswertung relevanten Informationen enthalten sollen. Bei der kriminaltechnischen Aufgabenstellung resultiert daraus eine kompakte Beschreibung des Nutzsignals, die die für den späteren Vergleich erforderlichen Individualmerkmale enthält. Der somit gewonnene Merkmalsatz muß mit den in Frage kommenden Datensätzen aus der Datenbank mit Hilfe einer geeigneten Merkmalsmetrik verglichen werden. Das daraus resultierende Abstandsmaß dient als Grundlage zur Erstellung der Hitliste.

Bei der Detektion von Restdrehriefen erhält man im Merkmalsextraktionsschritt dagegen ein skalares Merkmal, das als quantitatives Maß für die Ausprägung des unerwünschten Prozeßzustandes dient. Durch dessen Vergleich mit einem Schwellwert kann somit die Textur direkt beurteilt bzw. einer Güteklasse zugeordnet werden.

## 4 Vergleich von Projektilen

### 4.1 Beschreibung des Verfahrens

Die Anforderungen, die der kriminaltechnische Vergleich von Spuren auf Projektilen an die Bildakquisition stellt, sind besonders hoch: Es gilt, möglichst jede Individualität der Oberfläche reproduzierbar und mit gutem Kontrast zu erfassen. Um diesen Ansprüchen zu genügen, werden Bildserien unter systematischer Variation der Beleuchtungsrichtung, Gegenstandsweite und der Objektpose mit Hilfe eines Makroskopes aufgenommen,

digitalisiert und anschließend zu einem hochwertigen Resultat fusioniert. Die genaue Vorgehensweise kann in [10] nachgelesen werden.

Die Vorverarbeitung dient zur Unterdrückung von aufnahmebedingten Inhomogenitäten. Da die individuelle Ausprägung der Riefen dabei möglichst unverändert bleiben soll, wird lediglich eine Homogenisierung 1. Ordnung durchgeführt, die zu einem Bild mit konstantem mittleren lokalen Grauwert führt [3]. Die Homogenisierung wird anhand einer Hochpaßfilterung realisiert.

Beim anschließenden Abstraktionsschritt wird das verfügbare Modellwissen ausgenutzt, um die über das Bild verteilte Information über den Speiseprozeß zu konzentrieren. Aufgrund der Kinematik des Verfeuerungsprozesses werden alle individuellen Ausprägungen im Lauf der Waffe notwendigerweise in Riefen abgebildet. Daher stellen sämtliche Grauwertschwankungen entlang der Riefen Störungen dar, die im Modell durch den tiefpaßgefilterten Rauschprozeß  $n(\bar{x})$  pauschal berücksichtigt worden sind, und die durch die Projektion  $p(\xi)$  in Riefenrichtung wirksam unterdrückt werden:

$$\begin{aligned} p(\xi) &= \int g(\bar{x}) d\eta \\ &= \int g \begin{pmatrix} \xi \cos \alpha - \eta \sin \alpha \\ \xi \sin \alpha + \eta \cos \alpha \end{pmatrix} d\eta. \end{aligned} \quad (1)$$

Die dadurch erzielte Konzentration der wesentlichen Informationen führt aber auch zu einer erheblichen Datenreduktion, was zu einer effizienten Realisierung des späteren Vergleiches beiträgt.

Um die Projektion in Riefenrichtung durchzuführen, wird die Kenntnis des Riefenwinkels  $\alpha$  benötigt. Dieser kann z.B. aus der radialen Projektion des Periodogrammes hinreichend genau bestimmt werden [2]. Allerdings hat man es in der Kriminaltechnik oftmals mit Projektilen zu tun, die infolge des Aufpralls stark deformiert sind. In solchen Fällen darf nicht weiterhin davon ausgegangen werden, daß die Riefen gerade sind; vielmehr müssen hier gekrümmte Riefen angenommen werden. Um in solchen Fällen eine Riefenverfolgung vornehmen zu können, kommen Verfahren zur lokalen Orientierungsanalyse und Riefenbegradigung zum Einsatz [2, 6, 7].

Die Projektion  $p(\xi)$  eignet sich nicht zum unmittelbaren Vergleich zweier Projektilen, da sie nicht nur die Individualspuren aus dem Lauf der Waffe enthält, sondern ebenfalls Informationen über Systemparameter, wie z.B. Anzahl und Breite der Züge im Lauf der Waffe. Daher muß aus der Projektion die für den Vergleich relevante Information über die Lage ausgeprägter Riefen gewonnen werden. Die selektive Extraktion heller bzw. dunkler Muster erfolgt anhand der morphologischen Top-Hat-Transformation [5]:

$$h(\xi) = p(\xi) - p(\xi) \circ e^r(\xi) \quad (2)$$

$$d(\xi) = p(\xi) \bullet e^r(\xi) - p(\xi), \quad (3)$$

wobei  $\circ$  den Opening-Operator,  $\bullet$  den Closing-Operator und  $e^r(\xi)$  ein ebenes Strukturelement der Größe  $r$  bezeichnen. Die Durchführung eines Openings bzw. Closings durch solch ein Strukturelement stellt eine nicht-

lineare Glättung dar, die anschaulich durch eine Abtastung des Projektionsverlaufs von unten bzw. oben mit einer stumpfen Nadel der Breite  $r$  beschrieben werden kann. In den resultierenden Signalen  $h(\xi)$  bzw.  $d(\xi)$  sind ausschließlich helle bzw. dunkle Peaks enthalten, die Riefenlage und -ausprägung indizieren. Bildet man nun die Differenz zwischen  $h(\xi)$  und  $d(\xi)$ , so erhält man ein Signal, in dem lediglich feine Peaks enthalten sind, während größere Strukturen, die vorwiegend systemrelevanten Spuren entsprechen, weitgehend unterdrückt sind:

$$q(\xi) = h(\xi) - d(\xi). \quad (4)$$

Das Signal  $q(\xi)$  stellt eine kompakte Darstellung der für den Vergleich wichtigen Informationen dar. Im eigentlichen Vergleich werden zwei Signale  $q_1(\xi)$  und  $q_2(\xi)$ , welche die Projektilen 1 und 2 beschreiben, auf Ähnlichkeit überprüft. Dies erfolgt durch Kreuzkorrelation der Signale  $q_1(\xi)$  und  $q_2(\xi)$ . Die Lage des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion  $k_{12}(\tau)$  gibt Auskunft über diejenige Verschiebung  $\tau_0$ , die zu der bestmöglichen Übereinstimmung zwischen den Bildern zweier Projektilen führt. Die Kenntnis dieser Verschiebung kann einem Sachbearbeiter behilflich sein, da sie zu einer erheblichen Reduktion der zur visuellen Auswertung von möglichen Spurenzusammenhängen benötigten Zeit beitragen kann.

Ferner soll ein Vergleich eines Projektils mit der als Bilddatenbank abgelegten Tatmunitionssammlung erfolgen. Das Ergebnis der Recherche soll in Form einer Hitliste von möglichen Spurenzusammenhängen dargestellt werden. Zur Festlegung der Reihenfolge der Hitliste wird ein Merkmal  $m_{12}$  verwendet, mit dem die relative Ausprägung des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion gemessen werden kann:

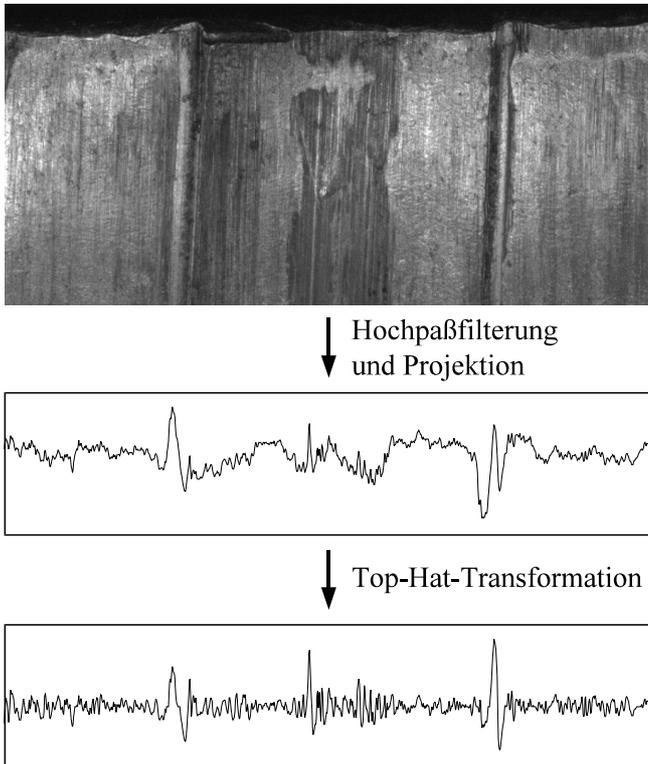
$$m_{12} = \left( \max_{\tau} \{k_{12}(\tau)\} - \hat{\mu}_k \right) / \hat{\sigma}_k, \quad (5)$$

wobei  $\hat{\mu}_k$  den empirischen Mittelwert und  $\hat{\sigma}_k$  die empirische Standardabweichung des Signals  $k_{12}(\tau)$  bezeichnen.

## 4.2 Experimentelle Ergebnisse

Zur Untersuchung des vorgestellten Verfahrens wurden Bilder von Projektilen, die teils mit gleichen, teils mit unterschiedlichen Waffen verfeuert worden waren, mit den in [10] beschriebenen Verfahren gewonnen. Als Ergebnis lagen mit 8 Bit quantisierte Grauwertbilder der Größe  $4096 \times 512$  vor. Bild 5 oben zeigt exemplarisch einen Bildausschnitt. Nach eindimensionaler Filterung mit Hilfe eines Gauß-Hochpasses quer zur Riefenrichtung wurde die Projektion in Riefenrichtung berechnet; siehe Bild 5 Mitte. Zur Peakdetektion wurde ein ebenes Strukturelement der Breite  $r = 15$  verwendet. Das Ergebnis  $q(\bar{x})$  wird anschließend in der Datenbank der Tatmunitionssammlung abgelegt; vgl. Bild 5 unten.

In Bild 6 sind zwei typische Kreuzkorrelationsfunktionen  $k_{12}(\tau)$  dargestellt. Die obere stammt von Projektilen, die von der gleichen Waffe verfeuert wurden, und weist ein ausgeprägtes Maximum auf ( $m_{12} = 10,46$ ). In der unteren, die von Projektilen unterschiedlicher Waffen stammt, ist kein ausgeprägtes Maximum erkennbar

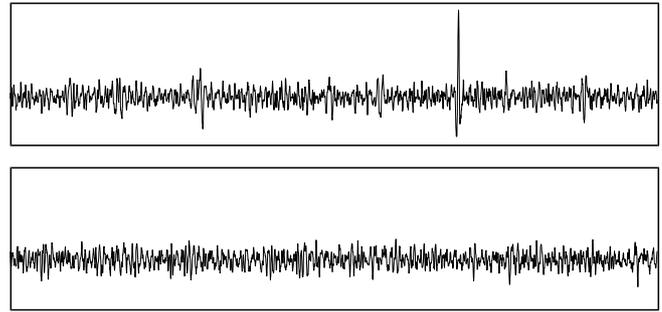


**Bild 5:** Zwischenergebnisse des Verfahrens zum Vergleich von Projektilen; oben: Grauwertbild, Mitte: Projektion  $p(\xi)$ , unten: Top-Hat-Transformierte  $q(\xi)$ .

( $m_{12} = 2,85$ ). Bei den durchgeführten Untersuchungen führten Projektilе gleicher Waffen zu Merkmalswerten  $m_{12} > 5$ , während bei unterschiedlichen Waffen stets Werte  $m_{12} < 5$  erhalten wurden. Dadurch konnte die Eignung des Merkmals  $m_{12}$  als quantitatives Maß für die Ähnlichkeit zweier Projektilе, und dadurch auch zur Festlegung der Reihenfolge der Hitliste, verifiziert werden.

Ein wichtiger Vorteil der Methode besteht in dem geringen Rechenaufwand für einen Einzelvergleich: Auf einem marktüblichen PC beträgt die Rechenzeit für den Vergleich zweier Signale  $q(\bar{x})$  ungefähr 100 ms. Für den Vergleich eines Projektils mit den maximal 1000 in Frage kommenden Projektilе aus der Tatmunitionssammlung wären daher weniger als 2 Minuten erforderlich, was sich mit Zusatzhardware entsprechend reduzieren ließe.

Dennoch muß noch darauf hingewiesen werden, daß der Erfolg des vorgestellten Verfahrens von mehreren Faktoren entscheidend abhängt. Erstens spielt die Qualität der Bilder eine essentielle Rolle, was einen sehr hohen Aufwand bei der Datenakquisition erfordert. Ferner hat man es in der Kriminaltechnik oftmals mit deformierten bzw. unvollständigen Projektilе zu tun, bei denen Ähnlichkeiten selbst von Experten oftmals nur schwer festzustellen sind. Um solche Objekte robust vergleichen zu können, sind Erweiterungen des präsentierten Verfahrens notwendig. Schließlich sei noch angemerkt, daß mit einem einzigen Signalverarbeitungsverfahren nicht jede Art von Ähnlichkeit festgestellt werden



**Bild 6:** Kreuzkorrelationsfunktionen  $k_{12}(\tau)$ ; oben: Projektilе gleicher Waffe, unten: Projektilе unterschiedlicher Waffen.

kann – die kognitiven Fähigkeiten des Menschen lassen weitaus komplexere Vergleiche zu. Daher wäre es für den praktischen Einsatz denkbar, zur Erstellung der Hitliste weitere Merkmale heranzuziehen, wobei solche, die große Ähnlichkeit indizieren, stärker gewichtet werden sollten.

## 5 Detektion von Restdrehriefen

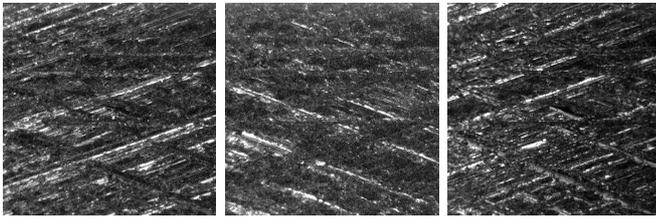
### 5.1 Beschreibung des Verfahrens

Drehriefenreste in der Oberflächentextur der Zylinderlaufbahn von Graugußmotoren indizieren einen zu früh beendeten Honprozeß und unterbrechen die für optimale Ölverteilung und -verbrauch ausgelegte Hontextur. Eine Teilaufgabe bei der automatischen Sichtprüfung von Hontexturen ist deshalb die sichere Detektion von Restdrehriefen, selbst wenn diese nur noch als Fragmente im untersuchten Texturausschnitt sichtbar sind.

Von einem Prüffleck werden drei Grauwertbilder  $g_i(\bar{x})$  erfaßt, wobei die Beleuchtung beim  $i$ -ten Bild so gewählt wird, daß die  $i$ -te Riefenschar mit hohem Kontrast sichtbar wird; siehe Bild 7. Die Wahl der Beleuchtungsrichtung erfolgt unter Ausnutzung der A-priori-Information aus den Entstehungsprozessen, wonach die Drehriefen näherungsweise senkrecht zur Zylinderachse liegen, d.h.  $\alpha_3 \approx 0^\circ$ , und die Honriefenscharen symmetrisch dazu unter den Winkeln  $\alpha_{1,2} \approx \pm\alpha_{\text{HW}}/2$ . Die senkrechte Beleuchtung verursacht an den Riefenrändern der Honriefenscharen deutliche Reflexionen, so daß in  $g_1(\bar{x})$  nahezu ausschließlich die von links unten nach rechts oben verlaufende Riefenschar zu sehen ist und im  $g_2(\bar{x})$  entsprechend die von rechts unten nach links oben gerichtete Schar. Bei  $g_3(\bar{x})$  zeigt sich, daß die Drehriefenränder schwächer ausgeprägt sind und schwächer reflektieren. Dies läßt sich durch den Honprozeß erklären, in dessen Verlauf die Drehtextur von Honriefen überlagert wird. Bei deutlicher Ausprägung verursachen die Honriefen auch bei der drehriefenoptimierten Beleuchtung vergleichsweise starke Reflexionen.

Im Vorverarbeitungsschritt wird völlig analog zu Abschnitt 4 lediglich eine Hochpaßfilterung zur Unterdrückung von langwelligeren Inhomogenitäten angewandt.

Auch der Abstraktionsschritt ist dem aus dem vorangegangenen Kapitel sehr ähnlich. Der Speisepro-



**Bild 7:** Gerichtet beleuchtete Bilder eines Texturausschnittes; links: 1. Honriefenschar  $g_1(\bar{x})$ , Mitte: 2. Honriefenschar  $g_2(\bar{x})$ , rechts: Drehriefenreste  $g_3(\bar{x})$ .

zeß jeder Honriefenschar modelliert die Verteilung der Schneidkörner auf den Honsteinen, die durch die Bewegung des Honwerkzeugs auf gerade Riefen abgebildet werden. Der Speiseprozeß der Drehriefen wird dagegen durch die Parameter des Drehprozesses bestimmt. Grauwertveränderungen entlang der Riefen stellen Störungen dar, die durch die Berechnung der Projektion  $p_i(\xi_i)$  in Riefenrichtung  $\eta_i$  unterdrückt werden:

$$p_i(\xi_i) = \int g_i(\bar{x}) d\eta_i. \tag{6}$$

Die Nutzinformation für jede Riefenschar liegt nun komprimiert in Form einer Projektionsfunktion vor. Die genauen Projektionswinkel  $\alpha_i$  werden ebenfalls mit der Methode der radialen Projektion des Periodogrammes bestimmt [2].

Um ein Merkmal  $m$  für die relative Ausprägung von Restdrehriefen zu gewinnen, wird der Drehriefenanteil der Textur mit dem der Honriefen verglichen. Dazu wird jede Projektionsfunktion  $p_i(\xi_i)$  quadriert und integriert. Durch die Quadrierung der Projektionen werden aus den Integrationswerten Leistungsanteile  $L_i$  [2, 4]. Integriert man zusätzlich über einen kleinen Winkelbereich  $[\alpha_i - \Delta\alpha, \alpha_i + \Delta\alpha]$ , so wird die Leistungsmessung robust gegenüber kleinen Schwankungen der Winkellage einzelner Riefen innerhalb einer Schar:

$$L_i = \int_{\alpha_i - \Delta\alpha}^{\alpha_i + \Delta\alpha} \int (p_i(\xi_i))^2 d\xi_i d\alpha_i. \tag{7}$$

Anschließend wird das Verhältnis gebildet aus dem Integrationswert der Drehriefenschar und der Summe der Integrationswerte der Honriefenscharen 1 und 2:

$$m = \frac{L_3}{L_1 + L_2}. \tag{8}$$

Somit läßt sich  $m$  als der relative Leistungsanteil der Drehriefen in der untersuchten Hontextur deuten.

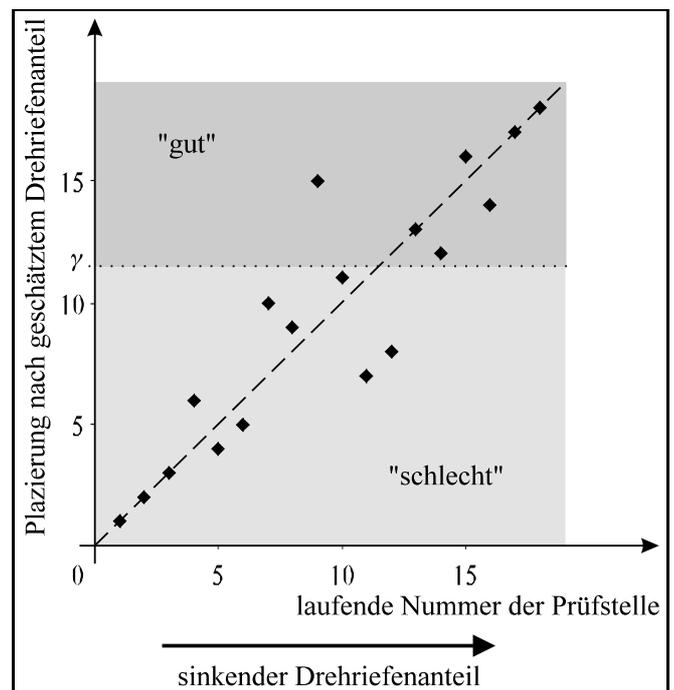
Die Bewertung der Hontextur erfolgt schließlich durch Zuordnung der berechneten Werte des Merkmals  $m$  zu verschiedenen Klassen. Im Falle einer Prozeßüberwachung wird zwischen guten und nachzubessernden Oberflächen unterschieden, wobei die beiden Klassen mittels eines Schwellwertes  $\gamma$  unterschieden werden. Der Schwellwert kann mit Hilfe einer Lernstichprobe ermittelt werden.

## 5.2 Experimentelle Ergebnisse

Die hier beschriebene Vorgehensweise zur Detektion von Restdrehriefen wurde experimentell anhand eines speziell präparierten Zylinders untersucht. Der Zylinder wurde auf konische Form vorgedreht und dann so gehont, daß die Zylinderoberfläche von einem Bereich nahezu vollständiger Drehtextur langsam übergeht in eine vollständige Hontextur. Auf diese Weise konnten die jeweils drei notwendigen Grauwertbilder an einer Folge von 18 Prüfstellen mit kontinuierlich steigendem Honriefenanteil aufgenommen werden. Die Ergebnisse der Auswertung mit dem in Abschnitt 5.1 beschriebenen Verfahren sind in Bild 8 veranschaulicht, wobei statt der relativen Leistungsanteile  $m$  die sich daraus ergebende Reihenfolge gegen die Prüfstellennummer aufgetragen ist.

Das Bild zeigt auch, daß der Trend im Rahmen der durch Prüfstellenwahl und Varianz des stochastischen Speiseprozesses verursachten Unsicherheit nachvollzogen werden kann. Diese ist insbesondere für die Vertauschungen im mittleren Bereich der Folge zuständig. Ein visueller Vergleich der Ergebnisse mit den Grauwertbildern bestätigt dies. Da die Prüfstellen 13 bis 18 keinerlei Drehriefenspuren mehr aufweisen, muß der Schwellwert  $\gamma$  über dem größten an diesen Stellen berechneten Merkmalswert  $m = 0,26$  liegen. Alle Leistungsanteile, die kleiner als dieser Wert sind, führen zur Einordnung in die Klasse der „guten“ bzw. drehriefenfreien Oberflächen. Bild 8 zeigt, daß bei Prüfstelle Nr. 9 eine Fehlklassifizierung vorliegt: Die Textur wurde als gut bewertet, obwohl sie Drehriefenspuren enthält. Der betroffene Texturausschnitt weist einen außergewöhnlich ausgeprägten Teil der ersten Honriefenschar auf, was bei der Verhältnisbildung direkt in das Ergebnis eingeht. Dieser

**Bild 8:** Reihenfolge des berechneten Drehriefenanteils im Vergleich zur Prüfstellennummer.



Detektionsfehler verdeutlicht die Problematik der Lage und Größe des geprüften Texturausschnitts. Die Prüfnormen zur Beurteilung gehonter Zylinderlaufflächen fordern deshalb in der Regel mehrere Prüfstellen in unterschiedlicher Höhe und an verschiedenen Punkten des Zylinderumfangs [8].

<http://www-mrt.mach.uni-karlsruhe.de/~puente>  
<http://www-mrt.mach.uni-karlsruhe.de/~krahe>

## 6 Zusammenfassung

Am Beispiel riefentexturierter Oberflächen wurde gezeigt, wie die Verfügbarkeit eines signaltheoretischen Modells verwendet werden kann, um gleichzeitig das Nutzsignal zu konzentrieren und Störungen zu unterdrücken, und daraus aussagekräftige Merkmale zu extrahieren.

Anhand zweier praxisrelevanter Beispiele, dem Vergleich von Schußwaffenprojektilen für die Kriminaltechnik sowie der Detektion von Restdrehriefen an gehonten Oberflächen, wurde die vorgestellte Methodik erläutert. Schließlich wurden exemplarisch Möglichkeiten zur Ausführung der Signalverarbeitungsschritte vorgestellt. In beiden Anwendungsfällen konnte die kompakte Beschreibung der Nutzinformation ausgenutzt werden, um den im praktischen Einsatz wichtigen Anforderungen hinsichtlich Robustheit und Effizienz zu genügen.

### Literatur

- [1] *Beyerer, J.*: Suppression of stochastically placed, straight toolmarks to enhance objects and defects. *Technisches Messen* 59 (1992), S. 389–397.
- [2] *Beyerer, J.*: Analyse von Riefentexturen. VDI Fortschrittberichte, Reihe 8, Nr. 390, VDI-Verlag, Düsseldorf (1994).
- [3] *Beyerer, J.* und *Puente León, F.*: Suppression of inhomogeneities in images of textured surfaces. *Optical Engineering* 36 (1997), S. 85–93.
- [4] *Bracewell, R. N.*: The Fourier Transform and its Applications. McGraw-Hill, Tokyo (1978).
- [5] *Haralick, R. M.* und *Shapiro, L. G.*: Computer and robot vision. Addison-Wesley, Reading (1992).
- [6] *Hellstern, T.*: Lokale Orientierungsanalyse und Riefenbegradigung für den automatischen Vergleich von Projektilen. Diplomarbeit, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (1996).
- [7] *Kass, M.* und *Witkin, A.*: Analyzing Oriented Patterns. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 37 (1987), S. 362–385.
- [8] *Krahe, D.*: Zwischenbericht zum DFG-Projekt „Zerstörungsfreie Prüfung der Textur spanend bearbeiteter Oberflächen anhand von 2D- bzw.  $2\frac{1}{2}$ -D-Daten der Oberfläche“. Interner Forschungsbericht AV 8/95, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (1995).
- [9] *Puente León, F.*: Enhanced imaging by fusion of illumination series. In: *Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing*, Proc. SPIE 3100 (1997).
- [10] *Puente León, F.* und *Beyerer, J.*: Datenfusion zur Gewinnung hochwertiger Bilder in der automatischen Sichtprüfung. Eingereicht bei Automatisierungstechnik (1997).

Die Autoren danken Herrn Dr.-Ing. J. Beyerer und Herrn Dipl.-Ing. T. Engelberg für viele anregende Diskussionen und wertvolle Hinweise.

**Dipl.-Ing. Fernando Puente León** und **Dipl.-Ing. Doris Krahe**, Universität (TH) Karlsruhe, Institut für Meß- und Regelungstechnik, D-76131 Karlsruhe.