

Kennzeichnung von Verschleißspuren auf gehonten Zylinderlaufbahnen durch Auswertung hochaufgelöster Scanbilder

**U. Lenhof, H.-P. Göttert, C. Breuer, Burscheid,
J. Seewig, Hannover, G. Beichert, Pattensen**

Kurzfassung

Der Zylinderwand-Scanner, der Zylinderlaufflächen am gesamten Umfang mit hoher Auflösung optisch abtastet, stellt ein neues Verfahren zur bildhaften Inspektion von Zylinderlaufbahnoberflächen dar. Ergebnis der Abtastung ist ein Gesamtbild der Oberfläche in Form eines 8Bit Grauwertbildes, das per digitaler Bildverarbeitung hinsichtlich funktionsschädlicher Oberflächenmerkmale ausgewertet werden kann. In diesem Beitrag werden das Konzept des Zylinderscanners und Beispiele für objektive Auswerteverfahren zur Detektion von Verschleißbildern vorgestellt.

1. Einleitung

Motorversuche zählen nach wie vor zu den wichtigsten Verfahren in der Motorenentwicklung. Die Entwicklung von tribologischen Bauteilen, Schmierölen und die Überprüfung der geforderten Bauteillebensdauer lassen sich letztendlich erst mit einem erfolgreichen Motorversuchsprogramm abschließen. Nach erfolgreichem Ende des Motorversuches sind zur Ergebnisinterpretation und -dokumentation, außer den umfangreichen Untersuchungen an Kolben und Kolbenringen, Informationen über den Zustand des Zylinderrohres wichtig. U.a. werden

- Informationen über die Verschleißtiefe im oberen Umkehrpunkt der Kolbenringe,
- Informationen über die Rauheit der Zylinderlauffläche und
- vergleichbare und anschauliche Informationen über den Oberflächenzustand der Zylinderlauffläche

benötigt.

Im Kolbenring- und Zylinderlaufbuchsen-Entwicklungszentrum der Federal-Mogul Burscheid GmbH sind für die Lösung dieser Aufgaben besondere Verfahren und Lösungsansätze verwirklicht worden.

Die Messung der Verschleißtopografie des Zylinderrohres nach dem Motorversuch erfolgt mit einem Innenkonturmessverfahren, bei dem die verschlissene Zylinderform mygenau abgetastet wird.

Die mit bewährten Einstellbedingungen in Verwendung befindliche konventionelle Tastschnitttrauheitsmessung wurde durch ein lichtoptisch und dreidimensional messendes Weißlichtinterferometer ergänzt. Diese dreidimensionale Rauheitsmessung erfolgt hochauflösend auf einem ca. 1 mm² großen Messfleck. Dieser 3D Rauheitsmessfleck kann jedoch nur eingeschränkt zur Bewertung der gesamten gelaufenen Zylinderoberfläche herangezogen werden (Mikrodokumentation), da dieser Messfleck nur einen sehr geringen Teil der von Kolben und Kolbenringen überstrichenen Fläche dokumentiert.

Die abschließende Dokumentation für die visuelle Beurteilung der gesamten gelaufenen Zylinderlauffläche (Makrodokumentation) erfolgt daher mit einem weiteren Gerät, dem Zylinder-scanner, in Form von lichtoptisch abgetasteten Digitalbildern am PC. Diese fotoähnliche Dokumentation der verschlissenen Zylinderlauffläche ist bei Federal-Mogul Burscheid GmbH erdacht worden. Ein einfacher Prototyp eines Zylinder-scanners wurde dort geplant, entwickelt und gebaut. Nach erfolgreichem Nachweis dieser Dokumentationsmöglichkeit ist ein robuster, industriell einsetzbarer Zylinderscanner im Auftrag von Federal-Mogul Burscheid GmbH bei der Fa. BMT (Breitmeier Messtechnik, Ettlingen) gebaut und in enger Zusammenarbeit perfektioniert worden. Dieses Gerät ist seit ca. 2 Jahren im Zentralen Messraum der Federal-Mogul Burscheid GmbH im bewährten Einsatz (Bild 1).

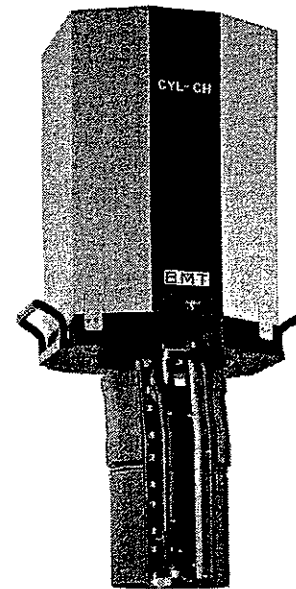


Bild 1: Der Zylinderwand-Scanner.

2. Dokumentation von Zylinderlaufflächen

Die Beurteilung und Dokumentation von Zylinderlaufflächen stellte bisher ein sehr aufwendiges Problem dar oder ist unzureichend. Mit der sogenannten Spiegelkelle kann sich der Betrachter einen optischen Eindruck der Zylinderlauffläche verschaffen. Effekte wie polierte Bereiche, Kratzer, Verkokungen, Fressspuren und Korrosionsflecke können beobachtet und diskutiert werden. Allein die aufwendige Zylinderfotografie mit einer Spezialkamera und an die Krümmung angepasstem Spezialobjektiv ermöglichte die bildhafte Abwicklung und Do-

kumentation dieses Bauteils als Gesamtübersicht. Mit speziellen Winkelmikroskopen oder mit konventioneller Fotografie am aufgeschnittenen Bauteil lassen sich einzelne Stellen fotografisch erfassen. In Ausnahmefällen wird auch heute noch die Zylinderlauffläche abgemalt. Am Markt befindliche Zeilenkameras haben nur geringe Auflösungen und sind nur mit spezieller Software verwendbar.

Eine einfache, schnelle Lösung zur effektiven Zylinderlaufächendokumentation wurde bei Federal-Mogul Burscheid GmbH durch den Einsatz eines hochwertigen Flachbettscanners gefunden, dessen Scannerleiste mit einer Auflösung von 1200 dpi rotatorisch bewegt werden muss.

Das Lastenheft für dieses Gerät wies für den typischen, universellen Einsatzfall bei Federal-Mogul Burscheid GmbH folgende Kriterien auf:

- Fotoähnliche Bildqualität,
- Verstellbarkeit für einen großen Bohrungsdurchmesserbereich,
- Verstellmöglichkeit in allen Achsrichtungen zur optimalen Justierung des Gerätes zur Bohrungsachse,
- Fixierung des Gerätes außerhalb der Bohrung mit dem Ziel, die komplette Zylinderlauffläche zu erfassen,
- Datenerfassung über handelsüblichen PC,
- mobiler Einsatz im prüfstandsnahen Umfeld.

Durch den zusammen mit der Fa. BMT entwickelten Zylinderscanner lassen sich die gestellten Forderungen erfüllen. Ungelaufene und gelaufene Zylinder im Durchmesserbereich von 72 mm bis 142 mm lassen sich problemlos digital in Umfangsrichtung fotorealistic abbilden. Zylinderlaufflächen können bis maximal 210 mm Höhe in einer Aufspannung an Motorblöcken und einzelnen Zylinderlaufbuchsen dokumentiert werden (Bild 2). Die Bilder mit bis zu 45 Bildpunkten pro Millimeter erlauben eine bisher nicht bekannte Abbildung der Zylinderlauffläche bei einem Messauf-

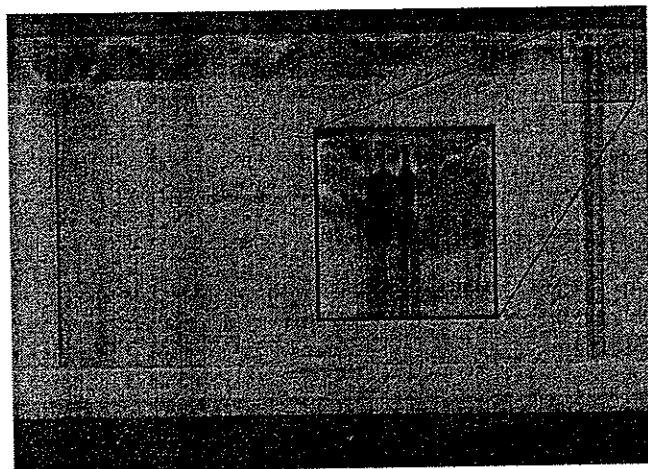


Bild 2: Gescannte Zylinderlaufbuchse.

wand von nur wenigen Minuten. Das Ergebnis liegt digital vor, kann weiterverarbeitet oder archiviert werden. Ein handelsüblicher PC mit einer einfachen Twain-Schnittstelle zur Bildfassung, die Standardtreibersoftware und eine Bildverarbeitungssoftware reichen aus, um mit diesem Gerät in wenigen Minuten eine ganzheitliche Abwicklung der Zylinderlauffläche zu erhalten.

Alle oben genannten Oberflächeneffekte lassen sich dokumentieren, bzgl. ihrer Position im Zylinderrohr exakt lokalisieren und archivieren. Die Bilder können ohne viel Aufwand elektronisch versendet und unabhängig vom Standort des Motors diskutiert und bewertet werden.

3. Auswertung von Zylinderlaufflächen

Die wie oben geschildert gewonnenen Bilddaten des Zylinderscanners werden bisher visuell von Experten ausgewertet und verbal beschrieben. Diese oft subjektive und umständliche Bewertung fordert geradezu eine leistungsfähige Bildverarbeitungssoftware heraus. Diese Bildverarbeitungssoftware sollte die Orientierung innerhalb der dokumentierten Fläche verbessern und Auswertemöglichkeiten bieten, um z.B. den Grad des Bore Polishing (auch Plattenbildung genannt) oder den Grad der Zylinderriefigkeit nach vorgegebenen Auswertelinien zu bestimmen.

Darüberhinaus interessiert, inwieweit Beeinflussungen der Zylinderlaufbuchsenoberfläche durch den Kolben oder durch die Kolbenringe stattgefunden haben. Ferner ist die Lage dieser Schädigungen (z.B. Druckseiten und/oder Bolzenrichtung) von Interesse.

Typische Probleme, wie das Zuordnen von Ursache und Wirkung bei Fresserscheinungen, Bauteilschäden und Verschleiß sollten sich mit der Software schnell visualisieren, dokumentieren und auswerten lassen.

Eine leistungsfähige Bildverarbeitungssoftware, die diese Anforderungen erfüllt und von Federal-Mogul Burscheid GmbH und ProAssess gemeinsam praxisnah entwickelt worden ist, soll nun in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt werden.

4. Interaktive Software zur Dokumentation und Auswertung gescannter Zylinderlaufflächen

Das Bild 3 veranschaulicht den mit dem Bildverarbeitungsprogramm *ZScan* interaktiv steuerbaren Datenfluss. Die Laufflächendaten werden per TWAIN-Schnittstelle vom Zylinderscanner in den Arbeitsspeicher des Rechners geholt. Es folgt optional eine Bildbearbeitung, um den Kontrast zu verbessern und um einen interessierenden Bildbereich koordinatengetreu festzulegen. Daran schließen sich zwei Programm-Module an, die programmtechnisch ähnlich aufgebaut sind:

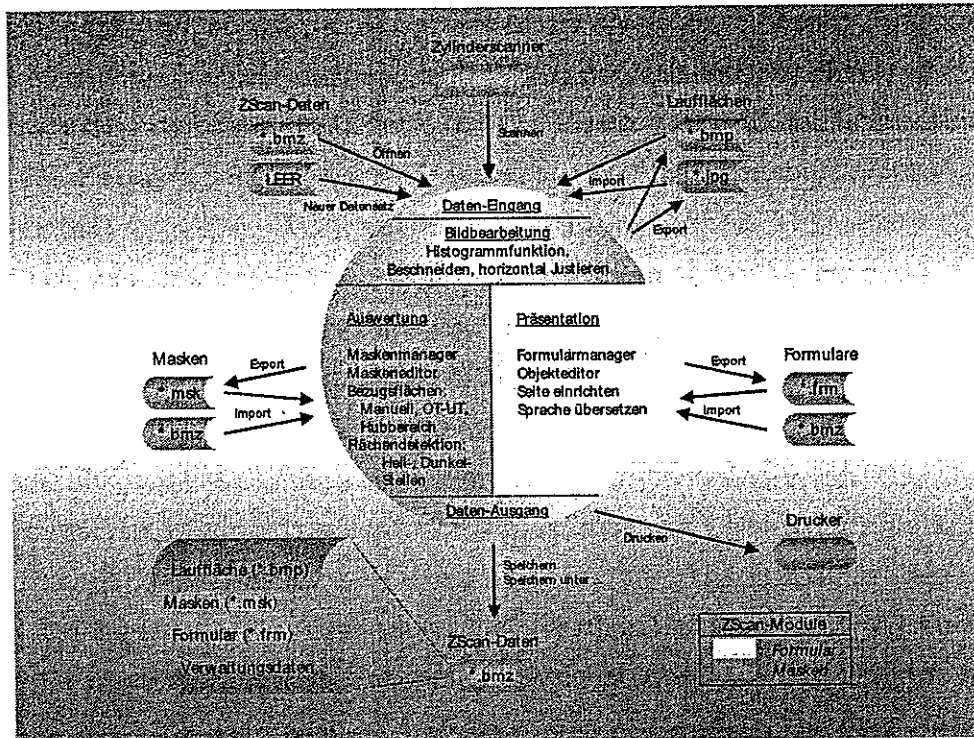


Bild 3: Datenfluss des Softwarepaketes Zscan.

Das Modul *Formular* dient der Präsentation der ausgewerteten Laufflächen. Mit Hilfe vordefinierter Formular-Objekte, die weitgehend frei editierbar sind, können ansprechende Protokollblätter gestaltet werden (Bild 4).

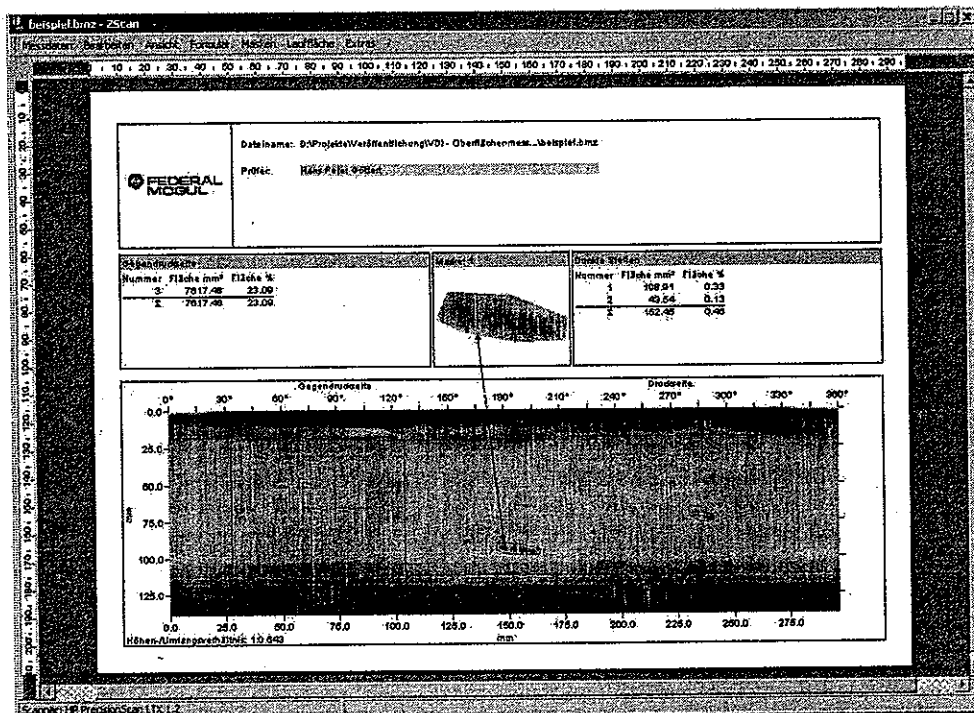


Bild 4: Formulardarstellung.

Die wichtigsten Formular-Objekte sind die Lauffläche selbst, die Auswertetabellen für maskierte Bereiche und Einzeldarstellungen von Masken.

Im Modul *Masken* (Bild 5) erfolgt die Auswertung der Laufflächendaten. Hier werden flächenhafte Ausprägungen maskiert und nach verschiedenen Kriterien gruppiert; die Flächenanteile der Masken, die Gesamtlaufläche und eine Bezugsfläche – z.B. der Hubbereich oder der Bereich zwischen dem oberen und unteren Totpunkt - werden berechnet. Auf die Algorithmik der Flächendetektion wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

Auf der Datenausgangsseite von *ZScan* besteht die Möglichkeit, das Formular auszudrucken und die Daten im *ZScan* eigenen Format abzuspeichern. Eine *ZScan*-Datei beinhaltet neben Verwaltungsdaten die eingescannten und vorverarbeiteten Laufflächendaten (im verlustfreien Windows-Format *.bmp), die Formulare und die Masken. Import- und Exportfunktionen gestatten es, die Laufflächen, die Formulare und die Masken auch separat zu verwalten, so dass eine einmal eingescannte Lauffläche mit verschiedenen Formularen oder Masken „kombiniert“ werden kann und Mehrfacharbeit vermieden wird. Zum anderen wird dadurch die Durchführung von Serienmessungen unterstützt.

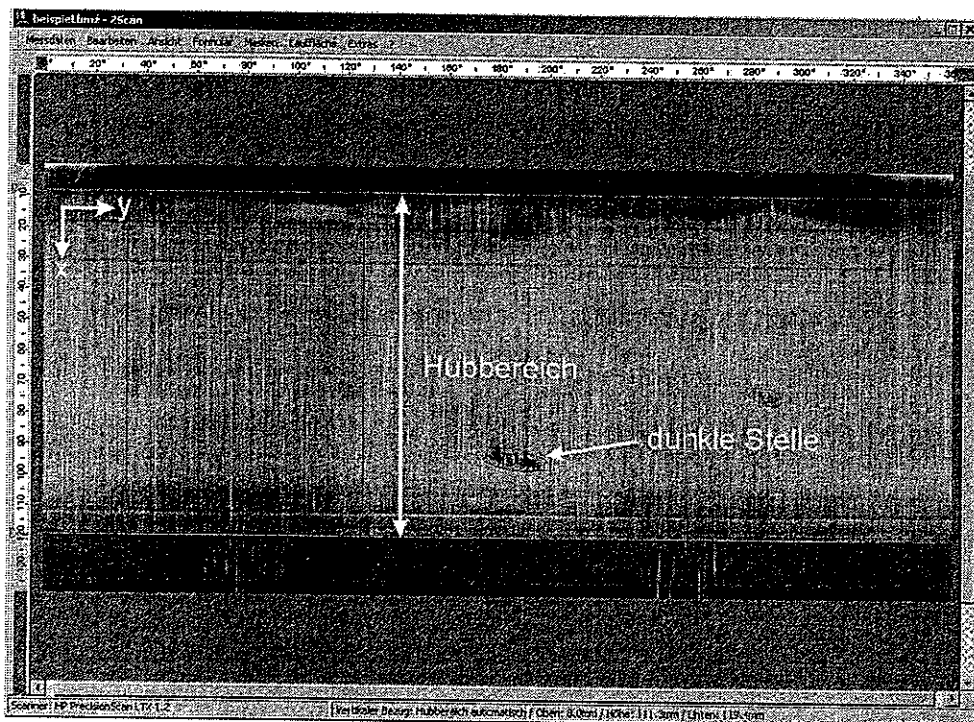


Bild 5: Maskendarstellung.

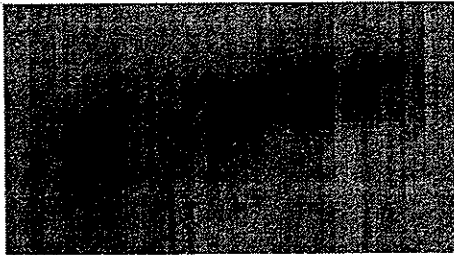
5. Signalverarbeitung (Vorbetrachtung)

Der Zylinderscanner bildet die Zylinderlaufläche als flächiges Grauwertbild $g(x, y)$ mit 256 Graustufen (8Bit) pro Pixel ab. Bild 5 zeigt beispielsweise den Scan einer gelaufenen Oberfläche mit typischen Dunkel- und Hellstellen sowie riefigen Bereichen. Die Aufgabe der Sig-

nalverarbeitung besteht nun darin, charakteristische Merkmale der Oberfläche zu extrahieren und hinsichtlich ihrer flächigen Ausprägung zu bewerten. Kennzeichnendes Merkmal in Bild 5 ist beispielsweise der Hubbereich des Kolbens und eine dunkle Stelle auf der Oberfläche.

Eine äquivalente Darstellung für das Grauwertbild einer gescannten Zylinderlaufbahn ergibt sich durch das sogenannte Höhen- oder Topografiemodell. Die Höheninformation der Topografie erhält man durch eine eindeutige Zuordnung zwischen Höhenwert und Grauwert eines Bildpixels. Bei 256 Graustufen entspricht gewöhnlicherweise ein schwarzer Pixel der Höhe 0 und ein weißer Pixel der Höhe 255. Entsprechend dieser Zuordnung ergibt sich für die dunkle Stelle (siehe Bild 5) beispielsweise das in Bild 6 dargestellte Höhenmodell.

“dunkle Stelle” auf der Zylinderlaufbahn



“dunkle Stelle” als Höhenmodell

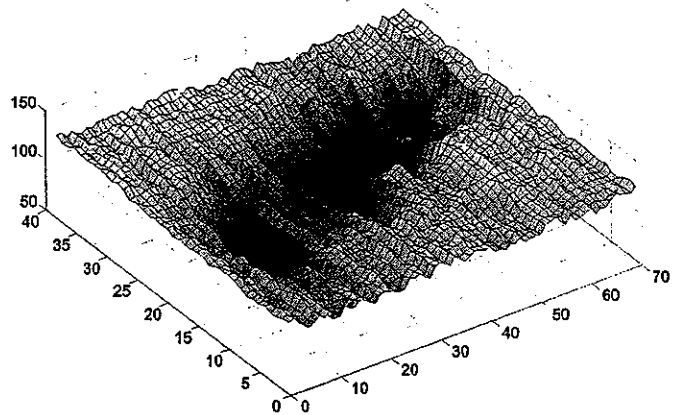


Bild 6: Darstellung eines Grauwertbildes durch ein äquivalentes Höhenmodell.

Der Speicherbedarf einer gescannten Lauffläche ist je nach gewählter Auflösung unter Umständen erheblich. Jedes Pixel $g(x,y)$ der gescannten Lauffläche belegt im Speicher ein Byte, woraus sich in Abhängigkeit der Scannerauflösung und der Laufbuchsenhöhe H in mm folgender Speicherbedarf bzw. folgende Bilddimension ergibt (siehe auch Bild 7):

$$Dim[g] = dpi \cdot \frac{H}{25.4} \times dpi \cdot \frac{297}{25.4} \quad (1)$$

Die Speichertiefe wächst quadratisch mit der Auflösung des Scanners. Bei der höchsten verfügbaren Scannerauflösung von 1200 dpi und einer Laufbuchsenhöhe von 180 mm ergibt sich beispielsweise ein Speicherbedarf von ca. 116 MByte (bei 8500 x 14000 Bildpunkten). Damit wird

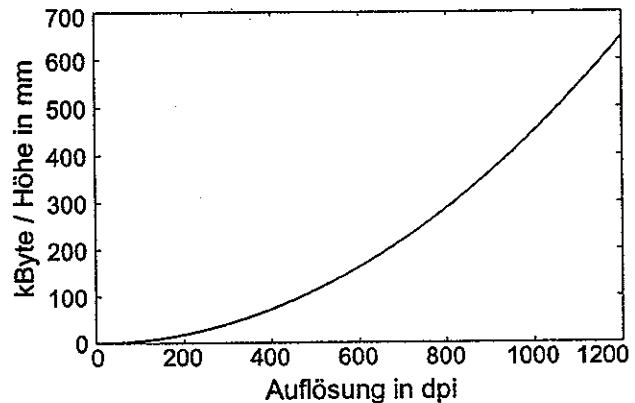


Bild 7: Speicherbedarf beim Scannen.

deutlich, welche Datenmengen die Algorithmen zur Erkennung von Flächendetails bewältigen müssen. Grundsätzlich ist es daher zweckmäßig, vorhandenes a priori Wissen bei der Entwicklung der Algorithmen zu berücksichtigen, um so die Ausprägung relevanter Oberflächendetails einzugrenzen und die Berechnungszeiten für Kennzahlen in einem für den Benutzer erträglichem Maß zu halten.

Automatisierte Bestimmung des Hubbereiches, Grauerthomogenisierung

Der Hubbereich der Zylinderlaufbuchse beginnt im oberen Totpunkt des oberen Kolbenrings und endet im unteren Totpunkt am untersten Kolbenring. Typischerweise lagern sich außerhalb des Hubbereiches Partikel auf der Zylinderlaufbuchse ab, so dass sich dieser Bereich dunkel einfärbt (siehe auch Bild 5). Aufgrund der gerichteten Kolbenbewegung ist im Höhenmodell der Oberfläche der Übergang zum Hubbereich durch eine Stufe gekennzeichnet. Unter idealen Voraussetzungen ist die Stufe in y-Richtung gleichmäßig über die Lauffläche ausgeprägt und somit ausschließlich eine Funktion von x ; im Folgenden durch $k(x)$ beschrieben. Das gescannte Grauwertbild $g(x,y)$ lässt sich mit diesem a priori Wissen durch eine lineare Überlagerung der Funktion $k(x)$ mit dem zu analysierenden Grauwertbild (Residuenbild) $r(x,y)$ wie folgt darstellen:

$$g(x,y) = k(x) + r(x,y). \quad (2)$$

Um den Hubbereich zu detektieren ist es erforderlich, die Funktion $k(x)$ aus dem gescannten Grauwertbild $g(x,y)$ mit geeigneten mathematischen Verfahren zu schätzen und die Bereiche der Stufen in $k(x)$ anschließend zu lokalisieren. Ein geeignetes Verfahren zur Bestimmung der Funktion $k(x)$ ist der L1-Schätzer [2], der auf folgendes Minimierungsproblem führt:

$$\sum_{\langle y \rangle} |g(x,y) - k(x)| \rightarrow \underset{k(x)}{\text{Min}} \Rightarrow \sum_{\langle y \rangle} \text{signum}(g(x,y) - k(x)) = 0. \quad (3)$$

Das Minimierungsproblem in Gleichung (3) wird gelöst, indem für jede Position x der Median in y -Richtung des Grauwertbildes $g(x,y)$ bestimmt wird. Zweckmäßig erfolgt dieser Schritt durch Anwendung eines Rangordnungsfilters [3]. Der aus der Schätzung ermittelte Verlauf $k(x)$ ist in Bild 8 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass im Bereich der Stufen ein abrupter Übergang im Höhenmodell der Grauwerte auftritt. Es liegt daher nahe, die Sprünge in $k(x)$ durch eine Gradientenbildung hervorzuheben. Für diesen Zweck stehen in der Bildverarbeitung eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung [4]. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass ein linearer Filteroperator besonders gut die sprunghaften Graustufenänderungen markiert. Der hierzu erforderliche Filteroperator ist wie folgt definiert:

$$\frac{\partial k(x)}{\partial x} \approx \sum_{\langle \xi \rangle} h(\xi) \cdot k(x - \xi) \quad \text{mit} \quad h(\xi) = \xi \cdot \frac{s(\xi)}{\sum_{\langle \tau \rangle} \tau^2 \cdot s(\tau)}. \quad (4)$$

Die Funktion h ist die sogenannte Gewichtsfunktion oder Impulsantwort des Filters. Die Funktion s stellt die Gaußsche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dar, die eine Abschwächung lokaler Störungen ausmittelt.

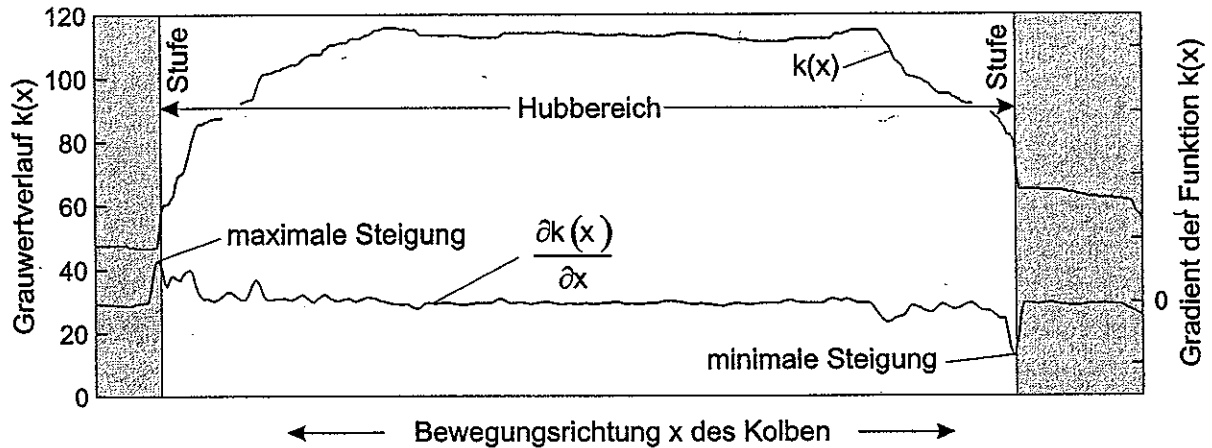


Bild 8: Geschätzte Stufenfunktion $k(x)$ sowie der Gradientenverlauf von $k(x)$ zur Detektion des Hubbereiches.

Der Verlauf des Gradienten in Bild 8 zeigt, dass im Bereich der linken Stufe ein Maximalwert und im Bereich der rechten Stufe ein Minimalwert auftritt. Beide Extrema kennzeichnen offenbar den Hubbereich im Grauwertbild, der jetzt auf einfache Weise ermittelt werden kann.

Durch Subtraktion der Stufenfunktion $k(x)$ vom gescannten Grauwertbild $g(x,y)$ erhält man schließlich das für die weitere Auswertung relevante Residuenbild $r(x,y)$ (Bild 9). Es wird deutlich, dass markant ausgeprägte Bereiche gegenüber Bild 5 deutlich hervortreten; durch Bestimmung der Funktion $k(x)$ lässt sich offenbar der gerichtete Hintergrundverlauf auf einfache Weise homogenisieren.

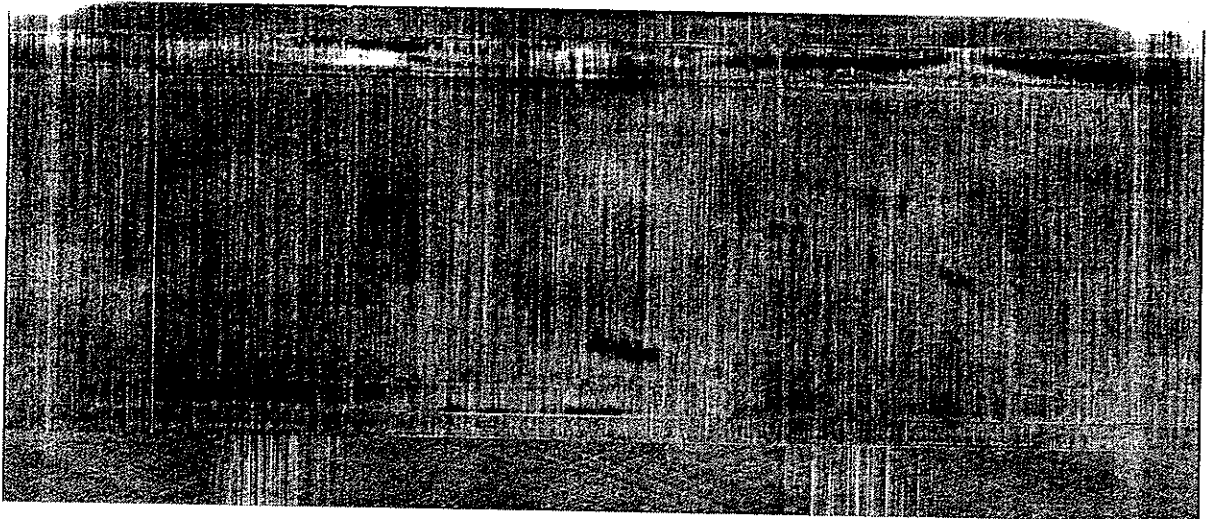


Bild 9: Homogenisierung des Grauwertbildes $g(x, y)$ durch die Stufenfunktion $k(x)$.

Automatisierte Erkennung dunkler und heller Stellen

Auf Basis des relevanten Residuenbildes $r(x, y)$ können durch geeignete Bildverarbeitungstechniken charakteristische Merkmale detektiert werden. Beispielsweise gehören zu diesen Merkmalen dunkle und helle Stellen auf der Oberfläche, deren Detektion im Folgenden näher erläutert werden soll. Ziel ist es, zusammenhängende Bereiche zu erkennen und ihre flächige Ausprägung prozentual einer Bezugsfläche, z. B. dem Hubbereich, gegenüberzustellen. Der Flussplan zur Merkmalsdetektion ist in Bild 10 dargestellt.

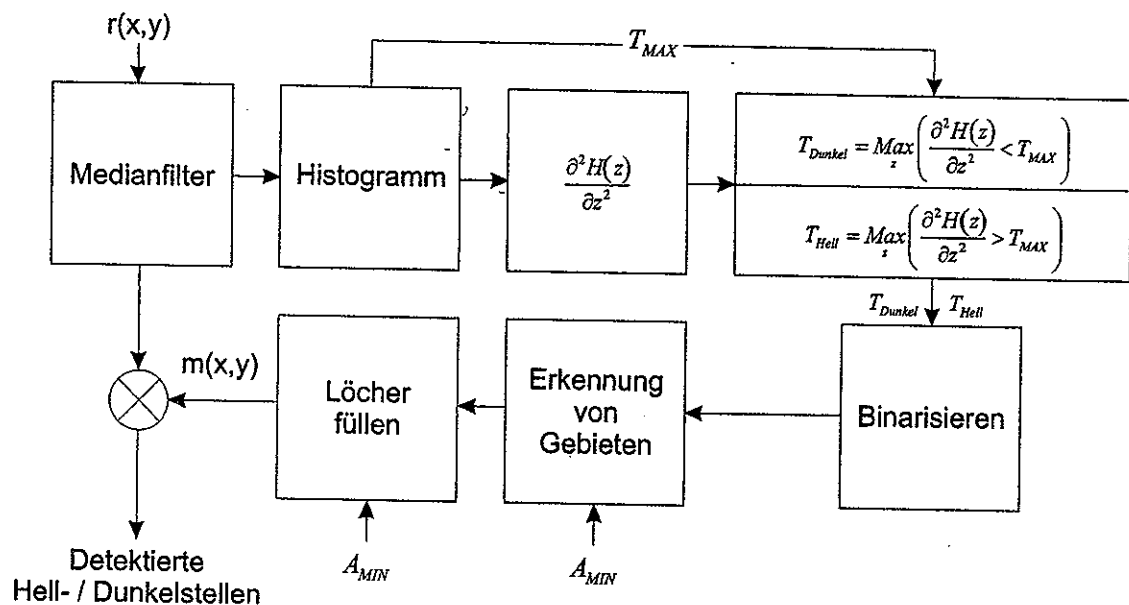


Bild 10: Flussplan zur Erkennung von dunklen und hellen Stellen.

Zur Unterdrückung von Störanteilen erfolgt zunächst eine kantenerhaltende Glättung des Residuenbildes $r(x, y)$ durch ein Medianfilter. Daran anschließend wird das Histogramm $H(z)$

der Grauwerte geschätzt sowie daraus das Histogrammmaximum T_{MAX} (der Grauwert, der zahlenmäßig am häufigsten auftritt) bestimmt. Definitionsgemäß liegen linksseitig des Grauwertes T_{MAX} dunkle und rechtsseitig helle Bildbereiche. Änderungen im Histogrammverlauf

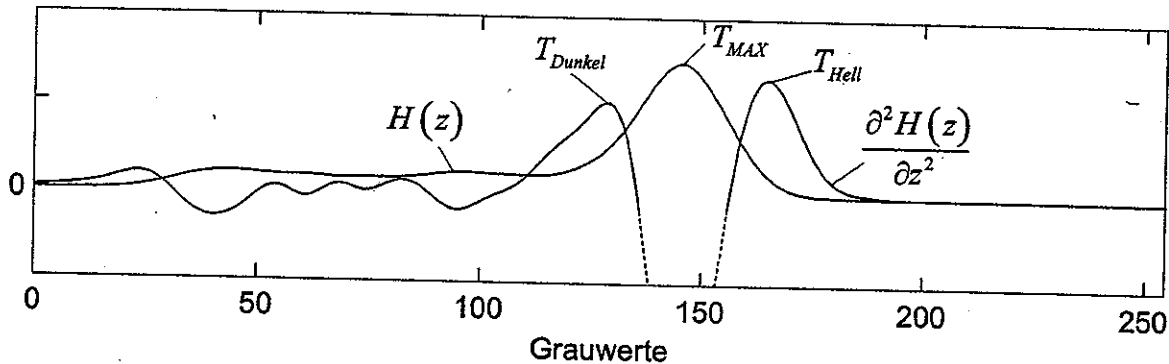


Bild 11: Histogramm und Krümmungsverlauf des Histogramms für das Residuenbild $r(x,y)$.

können nun dazu genutzt werden, Bildbereiche mit gleichen Grauwerten zu detektieren und so eine Segmentierung unterschiedlicher Merkmale auf der Oberfläche durchzuführen. T_{MAX} repräsentiert beispielsweise den vom Auge erfassten mittleren Grauwert der Oberfläche, und der plötzliche Anstieg auf T_{MAX} im Histogrammverlauf kann als Grenze zu den dunklen Stellen auf der Oberfläche interpretiert werden. Ein Maß für diesen Übergang stellt die Krümmung des Histogrammverlaufes $H(z)$ dar. Definitionsgemäß soll die maximal auftretende positive Krümmung linksseitig von T_{MAX} die Grauwertschwelle T_{Dunkel} repräsentieren. Eine entsprechende Vorgehensweise erfolgt rechtsseitig von T_{MAX} für die hellen Stellen durch die Grauwertschwelle T_{Hell} . Die Bestimmung des Krümmungsverlaufes lässt sich durch Einsatz eines modifizierten Savitzky - Golay Filters erreichen [5]:

$$\frac{\partial^2 H(z)}{\partial z^2} \approx \sum_{\langle \xi \rangle} h(\xi) \cdot H(z - \xi) \quad \text{mit} \quad h(\xi) = \frac{\left(\xi^2 \cdot \sum_{\langle \tau \rangle} s(\tau) - \sum_{\langle \tau \rangle} \tau^2 \cdot s(\tau) \right) \cdot s(\xi)}{\sum_{\langle \tau \rangle} s(\tau) \cdot \sum_{\langle \tau \rangle} \tau^4 \cdot s(\tau) - \left(\sum_{\langle \tau \rangle} \tau^2 \cdot s(\tau) \right)^2}, \quad (5)$$

wobei s erneut die Gaußsche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion darstellt.

Über einen Schwellwertoperator wird im nächsten Schritt eine Binarisierung der dunklen oder hellen Bereiche durchgeführt. Um eine Übersegmentierung zu vermeiden, werden auf Basis einer morphologischen Rekonstruktion ausschließlich zusammenhängende Gebiete durch Vorgabe einer Mindestflächengröße A_{MIN} zugelassen [6]. Auftretende Löcher innerhalb der Gebiete werden gefüllt und als nicht signifikant betrachtet, wenn ihre Fläche kleiner A_{MIN} ist. Das Ergebnis der Detektion dunkler Stellen ist die in Bild 12 dargestellte Binärmaske.



Bild 12: Gemäß Bild 10 generierte Binärmaske $m(x,y)$ zum Extrahieren dunkler Stellen auf der gescannten Zylinderlaufläche.

Jedes zusammenhängende Gebiet, im Bild als weißer Fleck visualisiert, entspricht einer dunklen Stelle mit einer Fläche größer als A_{MIN} .

Beim vorgestellten Verfahren wurde bewusst auf eine Strukturelement basierende morphologische Filterung zur Extraktion von Merkmalen verzichtet. Ein morphologisches Filter benötigt Vorwissen über die geometrische Ausprägung der Merkmale (rund, quadratisch, etc.). Die auftretenden Verschleißmuster lassen sich aber nur schwer durch passende strukturierende Elemente beschreiben, wodurch ein morphologisches Filter in Hinblick auf eine sichere Detektion von Oberflächenmustern nahezu unbrauchbar wird.

6. Ausblick

Die beschriebenen Mess- und Dokumentationsverfahren lassen sich je nach Aufgabenstellung einzeln oder in beliebiger Kombination bei gelaufenen Zylindern anwenden. Die vorgestellte Software zur Kennzeichnung von Verschleißspuren ist modular aufgebaut, so dass bei erweitertem Einsatzgebiet des Zylinderscanners, z. B. bei der Untersuchung ungelaufener oder vorbearbeiteter Zylinderlaufbuchsen, neue Algorithmen zur Erkennung weiterer Merkmale hinzugefügt werden können. Bedingt durch den rasanten Fortschritt bei der Scannertechnologie und der PC Entwicklung hat diese Technologie sicherlich noch großes Entwicklungspotential.

Die vorgestellten Verfahren bieten eine große Flexibilität bei der Bewertung von Versuchsergebnissen und steigern somit die Effektivität bei der Beurteilung von Motorversuchen.

Neben den hier vorgestellten Verfahren und der metallurgischen Betrachtung bei der Beurteilung von Zylinderlauflächen sollte die sogenannte Tribochemie zukünftig ebenfalls noch Be-

rücksichtigung finden. Es ist damit zu rechnen, dass auch die im Motorbetrieb erzeugten Ablagerungen in Zusammenhang mit den Bauteilmaterialien und Beschichtungen einen gewissen Einfluss auf die Lebensdauer und das Verschleißverhalten des tribologischen Systems aus Kolbenringen und Zylinder haben und dies zukünftig zunehmend mit steigender Wichtigkeit untersucht werden muss.

7. Schrifttum

- [1] Lenhof, U.; Zwein, F.: Messtechnik für Motorenzylinder, MTZ 5/2002 Jahrgang 63.
- [2] Huber, P. J.: Robust Statistical Procedures, 2. Auflage, SIAM, Philadelphia, 1996.
- [3] Klette, R., Zamperino, P.: Handbuch der Operatoren für die Bildbearbeitung, Vieweg, 1995
- [4] Soille, P.: Morphologische Bildverarbeitung, Springer Verlag, 1998
- [5] Seewig, J.: Praxisgerechte Signalverarbeitung zur Trennung der Gestaltabweichungen technischer Oberflächen, Dissertation Universität Hannover, Shaker-Verlag, 2000.
- [6] Haralick, R. M.; Shapiro, L. G.: Computer and Robot Vision, Volume I. Addison-Wesley, 1992. pp. 28-48.