Rekonstruktion von Schleifpapieroberflächen für die Qualitätskontrolle

Ursula Rost und Reinhard Koch

Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung,
Abteilung "Automatische Bildinterpretation", Prof. Dr.-Ing. C.-E.Liedtke,
Universität Hannover

Zusammenfassung *Ein zentrales Problem bei der industriellen Schleifpapierproduktion liegt in der Bestimmung von Oberflächenparametern, die eine objektive Qualitätskontrolle ermöglichen. Die in der Oberflächenprüfung üblicherweise eingesetzten taktilen Meßverfahren versagen hierbei aufgrund der hohen Rauhigkeit des Materials. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, das durch photometrische Stereobildanalyse eine Orientierungskarte eines unter dem Mikroskop aufgenommenen Schleifpapierausschnittes bestimmt. Mittels eines Integrationsverfahrens wird daraus ein Höhenmodell des Ausschnittes berechnet, aus dem sich die gesuchten Oberflächenparameter ableiten lassen. Die mit dem Verfahren erzielten Ergebnisse zeigen, daß auf diese Weise eine objektive Klassifizierung des Schleifpapiers in verschiedene Güteklassen ermöglicht wird.*

1 Einleitung

Bei der Produktion industrieller Güter gewinnt die Qualitätskontrolle als Teil des Produktionsprozesses zunehmend an Bedeutung. Ein wesentlicher Bestandteil ist hierbei die Oberflächeninspektion, bei der aus der Form und der Rauhigkeit einer Oberfläche auf die Qualität der hergestellten Güter geschlossen werden kann und die u.U. zu einer Änderung der Prozeßparameter führt.

Bei der Inspektion von Schleifpapier steht die Auswertung verschiedener Rauhheitskennwerte im Vordergrund. In den in der DIN 4768 [DIN90] genormten Rauhheitskennwerten spiegeln sich die in der Oberflächenmeßtechnik gebräuchlichen taktilen Meßverfahren wider. Bei dem weitverbreiteten Tastschnittverfahren wird die Oberfläche mechanisch mit einer Tastnadel entlang einer Geraden abgetastet. Auf diese Weise entsteht ein Profilschnitt der dreidimensionalen Oberflächengestalt der Prüfoberfläche [Kr80]. Sind die Höhendifferenzen und der Neigungswinkel entlang der abgetasteten Geraden zu hoch, kommt es zu Fehldarstellungen des Profils. Bei Amplituden im Bereich von einigen $100\mu m$, wie sie bei Schleifpapier üblich sind, reicht zudem die Vertikalausweichung der Tastnadel nicht mehr aus, um die vorgegebene Vorschubgeschwindigkeit einzuhalten. In diesem Fall wird die Nadel entweder seitlich am Maximum vorbeigeführt oder bricht die Spitzen der Oberfläche ab. Die extreme Rauhigkeit des Schleifpapiers führt dazu, daß die mechanische Vermessung der Oberfläche nicht mit hinreichender Genauigkeit möglich ist. Ein weiterer Nachteil des Tastschnittverfahrens liegt in dem Fehlen einer flächenhaften Vermessung des Höhenverlaufs.

Das von uns entwickelte und im folgenden vorgestellte Verfahren besitzt folgende Vorteile:

– Es arbeitet berührungslos.
– Das Ergebnis besteht in einem 3D-Modell eines Schleifpapierausschnittes.
– Die Genauigkeit der mit dem Verfahren erzielten Ergebnisse läßt eine zuverlässige Qualitätsbeurteilung zu.

In Abschnitt 2 dieses Artikels werden zunächst die grundlegenden Verfahren des geometrischen und photometrischen Stereos erläutert und im Hinblick auf das auszuwertende Material verglichen. Im darauffolgenden Abschnitt 3 wird das von uns entwickelte Verfahren genauer beschrieben.

Da bisher kein Verfahren existiert, welches eine vollständig korrekte Vermessung ermöglicht, wurden Verfahren zur Verifikation entwickelt, auf die in Abschnitt 4 eingegangen wird. Einige der mit dem Verfahren erzielten Ergebnisse werden schließlich in Abschnitt 5 vorgestellt.

2 Geometrische und Photometrische Stereobildanalyse

Ein häufig verwendeter Ansatz für die Bestimmung der 3D-Oberflächenstruktur eines Objektes besteht in der Methode des Geometrischen Stereos. Hierbei werden zwei Bilder des zu rekonstruierenden Objektes, die aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen wurden, zueinander in Beziehung gesetzt. Aus der relativen geometrischen Lage von Bildelementen, die mittels einer Korrespondenzanalyse in beiden Bildern lokalisiert werden können, läßt sich die Position des entsprechenden Oberflächenelementes im Raum bestimmen. Eine genauere Beschreibung des Funktionsprinzips kann beispielsweise [Ho86] entnommen werden.

Der Vorteil des Geometrischen Stereos besteht in der direkten Berechnung des 3D-Höhenmodells. Der Erfolg der Methode hängt jedoch von der Zuverlässigkeit der Korrespondenzanalyse ab. Diese beruht unter anderem auf einer ausgeprägten Textur und variierenden Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche. Schleifpapieroberflächen besitzen dagegen eine Struktur, die sich durch einheitliche Reflexionseigenschaften auszeichnet. Versuche mit aufgenommenen Stereobildpaaren haben gezeigt, daß eine Korrespondenzanalyse nur für ausgewählte Bildpunkte erfolgreich ist. Daher wurde für die 3D-Rekonstruktion des Schleifpapiers ein Verfahren auf der Basis der Photometrischen Stereobildanalyse entwickelt, welche die einheitlichen Reflexionseigenschaften der Oberfläche ausnutzt [Ra94].

Das Prinzip des Photometrischen Stereos beruht auf Erkenntnissen über den Bildentstehungsprozeß. Neben den optischen und geometrischen Eigenschaften der Kamera sowie der Art, Position und Beleuchtungsrichtung der Lichtquellen bilden die Reflexionseigenschaften der aufgenommenen Oberfläche einen wesentlichen Einflußfaktor.

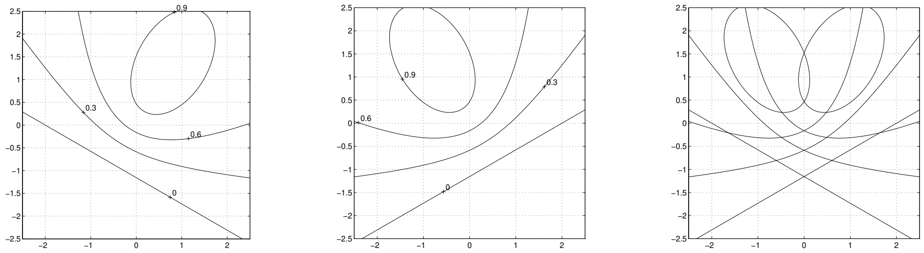
Das zu analysierende Objekt wird mit einer einzelnen Kamera, deren Position konstant ist, unter verschiedenen Beleuchtungsrichtungen aufgenommen. Mit

Hilfe einer Funktion, die die Reflexionseigenschaften der Oberfläche analytisch beschreibt, kann für jeden Punkt der Bildebene die Orientierung des korrespondierenden Oberflächenelementes berechnet werden. Arbeiten auf diesem Gebiet werden u.a. in [Wo80],[HB86] und [Ki88] beschrieben.

Als Hilfsmittel für die Beschreibung des Abbildungsprozesses wird die Reflexionskarte $R(p,q)$ eingesetzt. Sie beschreibt die photometrischen Eigenschaften eines Objektes bei Beleuchtung durch eine bestimmte Lichtquelle sowie für eine bestimmte Oberfläche.$R(p,q)$ bestimmt die Bildintensität als Funktion zweier Parameter p und q, welche die Neigung der Oberfläche in x- bzw. y-Richtung repräsentieren.

Ein Beispiel für ein Reflexionsmodell ist die Lambert'sche Reflexion. Die Lambert'sche Reflexion ist die Beschreibung einer ideal diffusen Oberfläche. Das Modell geht davon aus, daß das einfallende Licht gleichmäßig in alle Richtungen verteilt wird. Der Grauwert des Bildes ist hierbei nur noch abhängig von einem konstanten Reflexionsfaktor, auch Albedofaktor genannt und dem zwischen der Beleuchtungsrichtung $\mathbf{e_S}$ und der Oberflächennormalen $\mathbf{n}$ eingeschlossenen Winkel.

$$R_{lam}(p,q) = \rho \cdot \cos \sphericalangle(\mathbf{e_S}, \mathbf{n}) = \rho \cdot \mathbf{e_S}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{n} \tag{1}$$



a) b) c)

Abbildung1. Reflexionskarten für Lambert'sche Reflexion: a) R_1 entsteht bei Beleuchtung aus der Richtung $e_{S1} = (0.5, 0.87, 1)$ b) R_2 entsteht bei Beleuchtung aus der Richtung $e_{S1} = (-0.5, 0.87, 1)$ c) Einschränkung der Lösungsmenge durch Schnitt von R_1 und R_2

Abbildung 1a) zeigt eine Reflexionskarte R_1 für die Lambert'sche Reflexion bei konstanter Beobachtungsrichtung $(0,0,-1)$. Die Beleuchtungsrichtung für R_1 ist $\mathbf{e_{S1}} = (0.5, \sqrt{0.75}, 1)$. Für ein gegebenes Oberflächenmodell kann mit Hilfe einer Reflexionskarte direkt ein Grauwertbild erzeugt werden, das diese Oberfläche mit den in der Reflexionskarte festgelegten Oberflächen- und Beleuchtungsparametern darstellt. Die umgekehrte Abbildung eines Grauwertbildes auf die Orientierungskarte der dargestellten Oberfläche ist dagegen nicht eindeutig möglich. Da jeder Grauwert in einem aus einer festen Richtung aufgenommenen Bild einer Linie mit konstantem Grauwert innerhalb der Reflexionskarte, auch Isophote genannt, zugeordnet werden kann, gibt es zunächst unendlich viele Lösungen für die Orientierung des zugehörigen Oberflächenelementes. Um eine eindeutige Lösung zu erhalten, werden daher beim Photometrischen Stereo mehrere Aufnahmen unter verschiedenen Beleuchtungsrichtungen aufgenommen. Abbildung 1b) zeigt eine zweite Reflexionskarte R_2 mit der Beleuchtungsrichtung $\mathbf{e_{S2}} = (-0.5, \sqrt{0.75}, 1)$. Wie in Abbildung 1c) zu sehen ist, reduziert sich die Lösungsmenge durch den Schnitt von R_1 und R_2 auf maximal zwei Punkte, da dann je zwei Isophoten aus R_1 und R_2 höchstens zwei gemeinsame Punkte besitzen. Durch Hinzunahme einer dritten Beleuchtungsrichtung kann dann eine eindeutige Lösung bestimmt werden.

3 Verfahren

Das von uns entwickelte Verfahren zur 3D-Rekonstruktion von Schleifpapieroberflächen besteht aus zwei Teilschritten. Im ersten Schritt wird mit Hilfe der Photometrischen Stereobildanalyse eine Orientierungskarte eines aufgenommenen Schleifpapierauschnittes bestimmt. Hierbei sind aufgrund der besonderen Materialeigenschaften des Schleifpapiers einige Erweiterungen des von Woodham in [Wo80] beschriebenen Verfahrens notwendig. Um das für die Ermittlung der Rauhheitskennwerte erforderliche Höhenmodell zu erhalten, wird im zweiten Schritt ein Integrationsverfahren verwendet.

3.1 Erweiterungen des Photometrischen Stereos

Das hier verwendete Aufnahmesystem besteht aus einem Stereomikroskop, an das eine CCD-Kamera angeschlossen ist. Der aufgenommene Schleifpapierausschnitt liegt senkrecht zur Beobachtungsrichtung und weist eine Kantenlänge von annähernd 1 cm auf. Die Beleuchtung erfolgt aus einer Entfernung von 56 cm unter einem Winkel von 45° auf die Mitte der Objektoberfläche. Aufgrund dieser Entfernung kann eine parallele Beleuchtung angenommen werden.

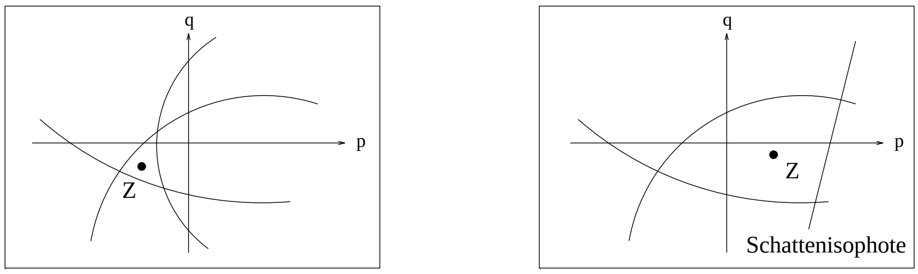
Durch die Vorbehandlung mit Graphitspray kann für das Reflexionsverhalten der Schleifpapieroberfläche das Lambert'sche Reflexionsmodell verwendet werden. Das bedeutet, daß theoretisch gesehen drei Beleuchtungsrichtungen ausreichen, um für jeden Punkt der Bildebene eine eindeutige Zuordnung zu einem Gradientenwert vornehmen zu können. Die den Grauwerten eines Punktes zugeordneten Isophoten $I(x, y)$ schneiden sich theoretisch in einem Punkt, der die gesuchte Neigung bestimmt. In der Praxis führen aufnahmetechnisch bedingte Störungen jedoch dazu, daß dieser Neigungswert in einem Gebiet liegt, das von den zugehörigen Isophoten begrenzt wird. Ist das Gebiet klein genug, läßt sich eine Lösung, die nur in relativ geringen Maße fehlerbehaftet ist, durch einen Punkt beschreiben, der von allen umgebenden Isophoten einen minimalen Abstand besitzt. In Abbildung 2a) ist diese Lösung durch einen mit "Z" markierten Punkt gekennzeichnet. Für jede Beleuchtungsrichtung $\mathbf{e_i}$ kann eine Reflexionskarte $R_i(p, q)$ angegeben werden mit $R_i(p, q) = R_{lam} = \rho \cdot \mathbf{e_{S_i}}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{n}(x, y)$

Das vorliegende Minimierungsproblem kann durch folgenden Ansatz beschrieben werden:

$$\sum_{i=1}^{N}(R_i(p,q) - I_i(x,y))^2 \longrightarrow Minimum \tag{2}$$

Hierbei bezeichnet $I_i(x,y)$ die Intensität des Punktes (x,y) im i-ten Bild und N die Anzahl der verwendeten Bilder. Aus Gleichung 3.1 ergibt sich durch Auflösung nach $\mathbf{n}$:

$$\mathbf{n}(x,y) = (\sum_{i=1}^{N} \mathbf{e}_{\mathbf{s_i}} \cdot \mathbf{e}_{\mathbf{s_i}}{}^T)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{N} I_i(x,y) \cdot \mathbf{e}_{\mathbf{s_i}} \tag{3}$$



a) b)

Abbildung2. Schnittgebiete von jeweils drei Isophoten mit dem sich daraus ergebenden Lösungswert: a) ohne Schattenisophote wird ein nur geringfügig fehlerhafter Lösungswert berechnet, b) durch die Schattenisophote kommt es zu einer stark fehlerbehafteten Lösung

Die Methode des Photometrischen Stereos ist in erster Linie für Oberflächen geeignet, die stetig gekrümmt sind. Abbruchkanten, wie sie an den Schleifkörnern auftreten, stellen Diskontinuitäten dar, die zu starken Schlagschatten führen. Liegt ein Punkt für ein oder mehrere Beleuchtungsrichtungen in einem Schattengebiet, kann dieser Ansatz zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Durch die Abschattung wird in diesem Fall eine falsche Isophote ausgewählt, welche die Messung verfälscht. Daher sind mehr als die theoretisch begründete Anzahl von drei Beleuchtungsrichtungen für die Auswertung erforderlich. Wir haben hier aus diesem Grund sechs Beleuchtungsrichtungen mit gleichmäßigem Abstand gewählt. Um die Verwendung von Schattenisophoten soweit wie möglich zu vermeiden, wird vor der Auswertung der Reflexionskarten eine Segmentierung der Schatten für die aus den sechs Richtungen aufgenommenen Bilder vorgenommen. Hierzu wird mit Hilfe einer Histogrammanalyse für jedes Bild ein separater Schwellwert bestimmt, der die Schattengebiete von den beleuchteten Gebieten trennt. Für die darauffolgende Berechnung der Normalenvektoren entstehen dann zwei mögliche Fälle:

Liegt ein Punkt für maximal drei Richtungen in einem Schattengebiet, kann Gleichung 3 zur Berechnung des Normalenvektors verwendet werden, wobei die Grauwerte und Reflexionskarten nur der Bilder verwendet werden, für die der Punkt nicht im Schatten liegt.

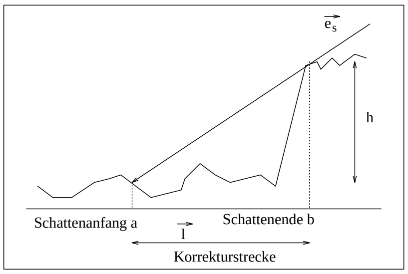


Abbildung3. Strahlenverfolgung zur Korrektur des Gradientenfeldes an Diskontinuitäten

Liegt ein Punkt für mehr als drei Richtungen im Schatten, entsteht bei Verwendung von Gleichung 3 ein fehlerhafter Wert. In diesem Fall kann das durch Photometrisches Stereo berechnete Gradientenfeld innerhalb des Schattengebietes durch die Analyse des Schattens korrigiert werden. Abbildung 3 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Da der Einfallswinkel des Lichtes a priori bekannt ist, läßt sich aus der Länge des in einem Einzelbild auftretenden Schattens der Höhenunterschied zwischen dem Punkt, an dem der Schatten beginnt und dem Punkt, an dem er endet, bestimmen. Gleichzeitig läßt sich der durch die Photometrische Stereobildanalyse gegebene Höhenunterschied durch Integration der Gradientenwerte innerhalb des Schattens entlang einer Geraden in Beleuchtungsrichtung berechnen. Die Differenz der beiden Höhenunterschiede gibt den Fehlerwert des Photometrischen Stereos an, aus dem ein additiver Korrekturfaktor für die fehlerhaften Gradientenwerte berechnet werden kann.

3.2 Integration

Das Ergebnis des Photometrischen Stereos besteht in zwei Orientierungskarten, welche die partiellen Ableitungen der Oberfläche in x- und y-Richtung darstellen. Daher kann die gesuchte Höhenkarte durch Integration des Gradientenfeldes ermittelt werden. Hierzu muß jedoch die Integrabilitätsbedingung erfüllt sein. Diese Bedingung ist jedoch aufgrund systemimmanenter Fehlerquellen, wie z.B. dem Meßrauschen, der Diskretisierung oder der Vereinfachung des Reflexionsmodells nicht erfüllt. Dies muß bei der Berechnung berücksichtigt werden.

In der Literatur wird die Integrabilität z.T. direkt in die Lösung mit einbezogen [HB86, Ho90] oder es werden Splines [Le88, Si90] oder Platten- und Membranmodelle [Te88] zur Integration verwendet. Das hier beschriebene Verfahren integriert die Orientierungskarten durch Anpassung von Oberflächenelementen quadratischer Ordnung unter Berücksichtigung eines stetigen Oberflächenverlaufes.

4 Verifikation

Es ist uns bisher kein technisches Verfahren bekannt, mit dem Schleifpapieroberflächen exakt vermessen werden können. Zudem stehen keine Referenzmodelle mit der genauen Rauhheitscharakteristik von Schleifpapier zur Verfügung, die gleichzeitig eine genau definierte Geometrie aufweisen oder die sich durch ein anderes Verfahren exakt vermessen lassen. Daher liegt ein besonderes Problem darin, zu verifizieren, inwieweit ein durch Photometrisches Stereo berechnetes Höhenmodell qualitativ und quantitativ mit der tatsächlichen Oberfläche übereinstimmt. Hierzu werden in den folgenden Abschnitten 4.1 bis 4.3 drei Ansätze vorgestellt.

4.1 Visueller Vergleich von realen und künstlichen Stereobildpaaren

Um einen qualitativen Vergleich zu ermöglichen, wurde mit Hilfe einer zweiten an das Stereomikroskop angeschlossenen Kamera ein Stereobildpaar eines Schleifpapierausschnittes aufgenommen. Aus der mit dem beschriebenen Verfahren erzeugten Höhenkarte kann ein synthetisches Stereobildpaar erzeugt und mit dem aufgenommenen verglichen werden. Der genaue visuelle Vergleich über ein Stereobetrachtungsgerät ließ nur sehr wenige qualitative Unterschiede erkennen. Da der menschliche Gesichtssinn für diese Form der Kontrolle gut geeignet ist, kann von einer qualitativ guten Übereinstimmung der berechneten Höhenkarte mit dem tatsächlichen Höhenverlauf ausgegangen werden.

4.2 Auswertung eines Objektes mit bekannter Oberflächengestalt

Die Auswertung eines 50-Pfennigstücks ergab die in Abbildung 4 gezeigte Höhenkarte (links im Bild). Das rechts abgebildete Höhenrelief läßt deutlich die Gesichtskonturen der "pflanzenden Frau" erkennen. Auch das Kopftuch und dessen rückwärtiger Knoten sind gut sichtbar. Dieses Beispiel verdeutlicht zudem die Robustheit des Lambert'schen Reflexionsmodells, da dieses Modell trotz der metallischen Oberfläche angewendet werden kann.

4.3 Auswertung einer porigen Oberfläche mit bekannter Geometrie

Eine für Schleifpapier charakteristische Eigenschaft liegt in der Porigkeit der Oberfläche. Um eine Referenzoberfläche mit dieser Charakteristik und geometrischen Abmessungen in der gleichen Größenordnung wie die der Schleifpapieroberflächen zu erhalten, wurde ein Gipsabdruck einer Rändelschraube angefertigt. Die Oberfläche dieses Gipsabdruckes wurde zum einen durch das in Abschnitt 2 beschriebene Verfahren ausgewertet, zum anderen zu Vergleichszwecken

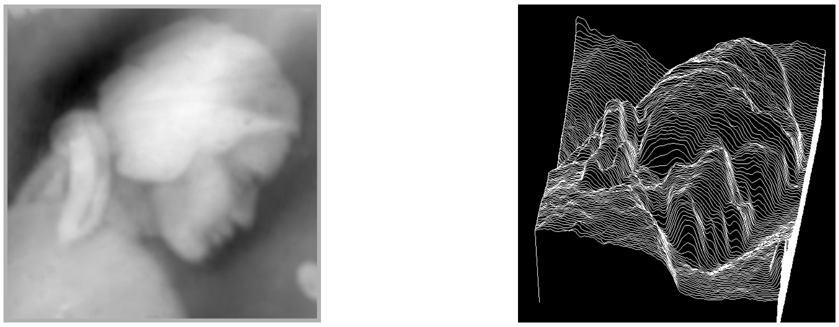


Abbildung4. Auswertung einer 50-Pfennigmünze: links Höhenmodell (je heller der Grauwert eines Punktes, desto näher ist dieser zum Betrachter), rechts Profillinien

durch ein Tastschnittverfahren. Hierzu wurden durch ein Tastschnittgerät auf einer quadratischen Fläche mit einer Kantenlänge von 1cm 200 Profilschnitte in einem Abstand vom $5\mu m$ durchgeführt. Abbildung 5 zeigt links ein Grauwertbild des Gipsabdruckes, in der Mitte die durch das Tastschnittverfahren gelieferte Höhenkarte und rechts die durch den beschriebenen Ansatz erzeugte Höhenkarte. Die qualitativ bessere Übereinstimmung mit der Originaloberfläche durch die mit unserem Verfahren erzeugte Höhenkarte zeigt die Überlegenheit des optischen Verfahrens gegenüber dem mechanischen auch bei weniger extrem rauhen Oberflächen wie sie das Schleifpapier darstellt.

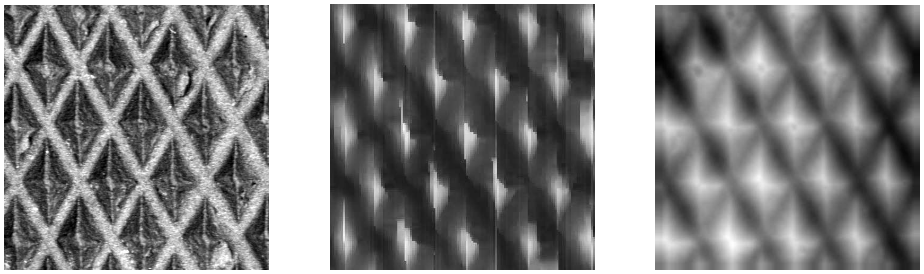
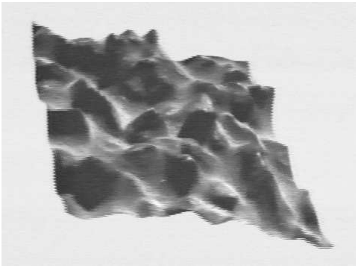


Abbildung5. Auswertung eines Rändelschraubengipsabdrucks: links - Grauwertbild, Mitte - mit Tastschnittgerät erzeugtes Höhenmodell, rechts - durch in Abschnitt 3 beschriebenes Verfahren erzeugtes Höhenmodell

5 Ergebnisse

Das von uns entwickelte und in diesem Beitrag beschriebene Verfahren wurde auf Schleifpapier mittlerer Körnung im Bereich von Körnung 24 bis Körnung 120 angewendet. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für einen Schleifpapierausschnitt der Körnung 24. Im linken Bild wurde das berechnete Höhenmodell mit der zugehörigen Phototextur versehen, das rechte Bild zeigt das Oberflächennetz.



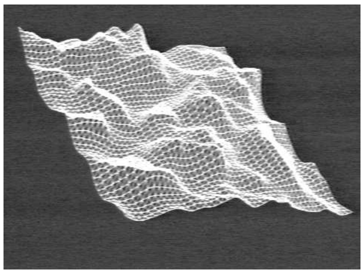


Abbildung6. 3D-Modell der Schleifpapierprobe $P24$ (links mit Phototextur, rechts Gittermodell)

Obwohl die auf diese Weise berechneten Modelle verfahrensbedingt eine gegenüber dem Original geglättete Oberfläche aufweisen, ist der Genauigkeitsgrad der Ergebnisse ausreichend, um zuverlässige Parameter für die Qualitätskontrolle zu bestimmen.

Ein für die Qualitätsbeurteilung relevanter Rauhheitskennwert ist der sogenannte Materialanteil, welcher in der DIN 4776 [DIN90] für Höhenprofile genormt ist. Der Materialanteil für eine gegebene Schnittlinie gibt das Verhältnis der materialerfüllten Länge l zur Gesamtmeßstrecke l_n an. Die ebenfalls in DIN 4776 genormte Abbotkurve stellt den Materialanteil als Funktion der Schnitthöhe dar. Durch sie wird die Materialverteilung im Rauhheitsprofil mit zunehmender Tiefe beschrieben. Mit dem Materialanteil, der sich mathematisch leicht auch für Flächen definieren läßt, kann bei Schleifpapieroberflächen überprüft werde, ob der Bindungsspiegel, d.h. die Leimschichthöhe in Bezug auf die Schleifkristalle einem vorgegebenen Normal entspricht. Abbildung 7 zeigt die Abbotkurven für drei Schleifpapierausschnitte der Körnung 60. Die Bindungsspiegel der Proben $P60\_3$ und $P60\_5$ weisen einen zu hohen bzw. zu niedrigen Bindungsspiegel auf, während der Bindungsspiegel der Probe $P60\_1$ dem Normal entspricht. Diese Eigenschaft spiegelt sich deutlich in den eingezeichneten Kurven wider.

Auch für die anderen zur Verfügung stehenden Schleifpapierproben mit Körnungen im Bereich von 24 bis 120 konnte dieses Verhalten verifiziert werden. Somit zeigt sich, daß mit dem hier beschriebenen Verfahren eine 3D-Rekonstruktion von Schleifpapieroberflächen ermöglicht wird, welche die zuverlässige Bestimmung von Rauhheitskennwerten für die Qualitätskontrolle erlaubt.

Literatur

[DIN90] DIN 4768: Ermittlung der Rauhheitskenngrößen R_a, R_z, R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 1990.

Abbildung7. Abbotkurven der Schleifpapierprobe $P60$

[Ho86] B.K.P.Horn: Robot Vision, MIT Press, 1986

[Ho90] B.K.P.Horn: Height and Gradient from Shading, International Journal of Computer Vision, Vol.5, No.1, 37-75, 1990.

[HB86] B.K.P.Horn, M.J.Brooks: The Variational Approach to Shape from Shading, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 33, No. 11, 174-208, 1986.

[Ki88] P. Kim, A. Burger: Calculation of Surface Position and Orientation Using the Photometric Stereo Method, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1988.

[Kr80] O.Kranz: Untersuchungen des Abtastvorganges bei der Rauhheitsmessung, PTB-Bericht, Braunschweig,1980.

[Le88] D.Lee: Algorithms for Shape from Shading and Occluding Boundaries, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 478-485, 1988.

[Ra94] D. Rapröger: Quantitative Messung der 3D-Geometrie einer technischen Oberfläche durch Stereobildpaarauswertung und vergleichende Analyse mit photometrischem Stereo, Diplomarbeit am Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Oktober 1994.

[Si90] T. Simonchy, R.Chellapa: Direct Analytical Methods for Solving Poisson Equations in Computer Vision Problems, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.17, No.5, 435-445, Mai 1990.

[Te88] D. Terzopoulos: The Computation of Vissible-Surface Representations, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.10,No.4, 7-438, 1988.

[Wo80] R.J.Woodham: Photometric method for determining surface orientation from multiple images. Optical Engineering **19** (1980) 139–144