

Oberflächencharakterisierung durch morphologische Filterung

*Fernando Puente León, Technische Universität München,
Jürgen Beyerer, Universität Karlsruhe*

Manuskripteingang: 20. August 2005; zur Veröffentlichung angenommen: 17. Oktober 2005

Morphologische Filter sind nichtlineare Methoden, die von der Übertragung mengentheoretischer Verfahren auf die Bildanalyse stammen. Im Zusammenhang mit Oberflächen liefern sie eine geeignete Beschreibung ihrer Abtastung sowohl durch mechanische Tastnadeln als auch durch andere Verfahren wie Rastersondenmikroskopie. Der Artikel veranschaulicht die Grundlagen morphologischer Filter, diskutiert ihre Vorteile gegenüber herkömmlichen linearen Filtern und befasst sich schwerpunktmäßig mit ihrer Anwendung auf die Oberflächencharakterisierung. Das Problem der Wiedergewinnung des wahren 3D-Profiles wird angesprochen, und die Bedingungen, die erfüllt sein müssen, um einen Informationsverlust zu vermeiden, werden diskutiert. Darüber hinaus werden neue formorientierte Methoden vorgestellt, mittels derer man Form, Welligkeit und Rauheit auf Basis der Profildaten errechnen kann.

Schlagwörter: Oberflächentopographie, mechanische Tastnadel, Rauheitsanalyse

Surface Characterization by Morphological Filtering

Morphological filters are non-linear methods that developed from the transfer of set-theoretic operations to image analysis. In the context of surfaces, they yield an adequate description of the sampling effect of both mechanical styli and other probing systems such as Scanning Probe Microscopy. The paper illustrates the fundamentals of morphological filters, discusses their advantages over conventional linear filters, and focuses on their application to surface characterization. The problem of recovering the true 3D profile is addressed, and the requisites to prevent a loss of information are discussed. Moreover, new shape-oriented methods to extract form, waviness, and roughness from profile data are presented.

Keywords: Surface topography, mechanical stylus, roughness analysis

1 Einleitung

Mathematisch gesehen kann ein fester Körper als eine 3D-Punktmenge beschrieben werden, deren Elemente alle räumlichen Punkte beschreiben, die zu dem Körper

gehören. Werden Verformungen vernachlässigt, so kann der mechanische Kontakt zwischen zwei verschiedenen Körpern als ein Grenzfall beschrieben werden, bei dem die zu den Körpern gehörige Schnittmenge der Punktmenge gerade leer ist.

Wenn eine gegebene Menge W ein Objekt beschreibt und S eine mechanische Tastnadel, entspricht das Abtasten der Objektoberfläche mit der Tastnadel dem systematischen räumlichen Verschieben von S derart, dass W und die verschobene Menge S sich gerade nicht überlappen. Eine genauere Analyse ergibt, dass dieses mechanische Abtasten einer Mengenoperation entspricht, die man Dilatation nennt. Da die Dilatation alle Verschiebungen des Mittelpunkts von S liefert, für die W und die verschobene Menge S gerade noch nicht überlappen, müssen sowohl die räumliche Ausdehnung als auch die Form von S berücksichtigt werden, um eine gute Rekonstruktion der wahren Oberfläche von W zu erhalten. Dies kann mittels einer Erosion – der dualen Operation zur Dilatation – erzielt werden.

Diese theoretischen Überlegungen über den mechanischen Kontakt zwischen festen Körpern führen unmittelbar zu der mathematischen Theorie der Punkt-mengen. Von dieser Sichtweise ausgehend liegt es nahe, die Weiterverarbeitung und die Auswertung abgetasteter Oberflächendaten auch innerhalb desselben, natürlich induzierten mathematischen Rahmens durchzuführen, anstatt zu anderen Methoden zu wechseln – wie z. B. zur linearen Filtertheorie, die hauptsächlich eingeführt wurde, um eine einfache technische Implementierung mit analogen elektronischen Schaltkreisen zu erzielen.

Glücklicherweise ist die Punkt-mengenalgebra, die gewöhnlich als *Morphologie* bezeichnet wird, ein tiefgründig ausgearbeitetes mathematisches Gebiet mit vielen anschaulichen Werkzeugen. Seit ihrer formalen Einführung durch Matheron und Serra [1] wurde sie intensiv weiterentwickelt und in der Bildverarbeitung angewandt.

In diesem Artikel plädieren wir für eine konsequente Anwendung der Morphologie – nicht nur um die wahre Oberflächentopographie auf Basis von Tastnadeldaten zu schätzen, sondern ebenfalls für die Weiterverarbeitung, Beschreibung und Auswertung dieser Daten. Die folgenden Abschnitte diskutieren wichtige Eigenschaften der grundlegenden morphologischen Operationen und zeigen auch ihre Vorteile im Vergleich zur linearen Signalverarbeitung.

2 Morphologische Filterung

Sei W eine willkürliche Punktmenge und S eine Punktmenge, die der Einfachheit halber als punktsymmetrisch angenommen wird. S wird das strukturierende Element genannt. Die grundlegenden Verfahren der Morphologie sind die Dilatation und die Erosion. Die Dilatation $W \oplus S$ einer Menge W durch S ist definiert als die Menge der Verschiebungen von S , für die die Schnitt-

mengen von W und dem verschobenen S nicht leer sind. Die Erosion $W \ominus S$ einer Menge W durch S ist definiert als die Menge der Verschiebungen von S , für die die verschobenen Mengen S komplett in W enthalten sind.

Bild 1 veranschaulicht die Ergebnisse der Dilatation und Erosion einer zweidimensionalen schmetterlingsförmigen Menge W durch ein kreisförmiges strukturierendes Element S . Wie man deutlich sieht, entfernt die Erosion feine Appendizes, da dort das verschobene S keine Teilmenge von W sein kann. Darüber hinaus ist beim Ergebnis der Erosion eine Schrumpfung um die Größe des Radius von S zu verzeichnen, da das verschobene S komplett in W enthalten sein muss. Daher gilt: $W \ominus S \subseteq W$. Im Falle der Dilatation wächst die Menge W in etwa um die Größe des Radius von S , und daher verschwinden feine Buchten – hier gilt: $W \subseteq W \oplus S$.

Die durch die Erosion verursachte Schrumpfung kann zum Teil dadurch ausgeglichen werden, dass man eine anschließende Dilatation anwendet. Die Reihenfolge $(W \ominus S) \oplus S$ dieser Operationen wird durch $W \circ S$ abgekürzt und als Öffnung (engl. *opening*) bezeichnet. Ebenso kann das durch die Dilatation verursachte Wachsen teilweise durch Anwendung einer Erosion rückgängig gemacht werden. Die Reihenfolge der Operationen $(W \oplus S) \ominus S$ wird durch $W \bullet S$ abgekürzt und als Schließung (engl. *closing*) bezeichnet.

Öffnung und Schließung liefern Mengen mit Grenzen nahe derer der Originalmenge W . Eine Öffnung entfernt feine Appendizes, die dünner als S sind, und bewahrt (d. h. öffnet) Buchten, während der Schließvorgang feine Halbinseln bewahrt und Buchten schmaler als S schließt. Beide Operationen können als formglättende Verfahren für W interpretiert werden, die Ergebnisse liefern, die nahe an W sind, sich aber in Details, die kleiner als S sind, unterscheiden.

Sei W ein Werkstück, und S beschreibe die Spitze einer mechanischen Tastnadel. Da $W \oplus S$ alle Verschiebungen von S beinhaltet, für die das verschobene S eine nichtverschwindende Schnittmenge mit W aufweist, sind die Grenzpunkte von $W \oplus S$ allesamt Mittelpunkte der verschobenen Menge S , sodass an diesen Orten das strukturierende Element S gerade W „berührt“. Daher ist eine Dilatation durch S gleichwertig zu einer mechanischen Abtastung der Oberfläche von W mit einer Tastnadel mit der Form von S . Um die wahre Form des Werkstücks selbst zu schätzen, ist es notwendig, den Verdickungseffekt der Dilatation auszugleichen, indem man eine Erosion durch S durchführt. $(W \oplus S) \ominus S$ besteht aus allen Verschiebungen von S , bei denen das verschobene S komplett in $(W \oplus S)$ enthalten ist. Im Wesentlichen gleicht dieser zweite Schritt die endlichen Abmessungen der Tastnadel infolge des mechanischen Ab tastens im ersten Schritt aus. Deshalb ist die beste

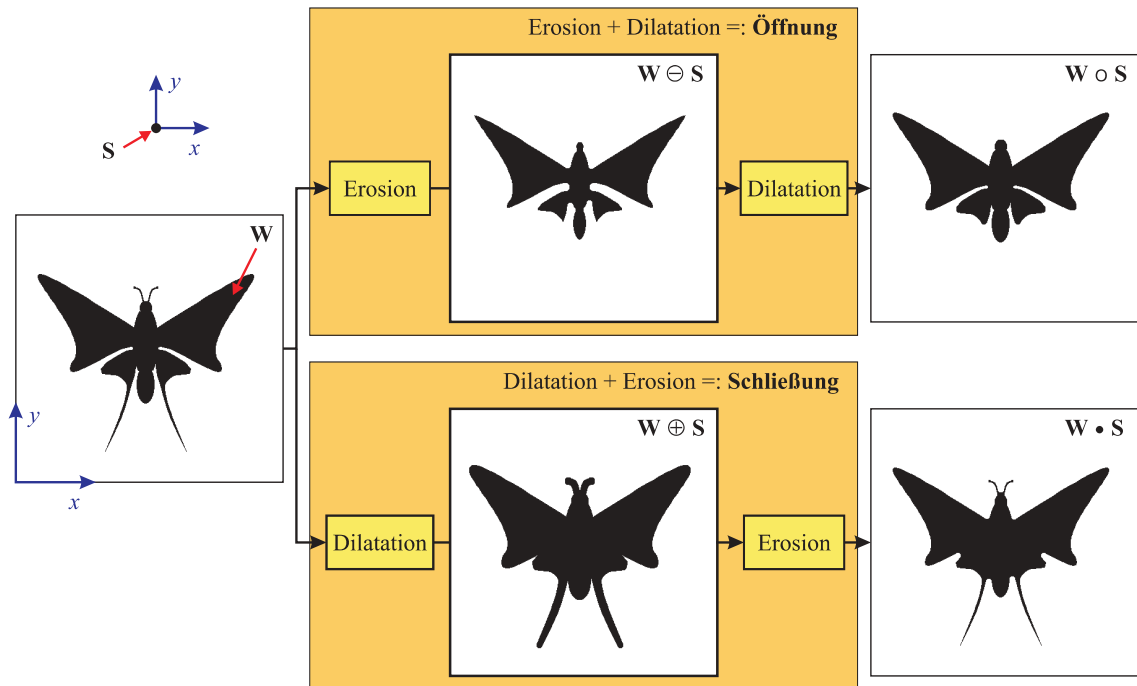


Bild 1: Darstellung der Erosion, Dilatation, Öffnung und Schließung einer 2D-Punktmenge. Erosion und Dilatation sind dual, aber nicht invers. Da die Verfahren nichtlinear sind, ist die Reihenfolge ihrer Anwendung wichtig. Dasselbe gilt für Öffnung und Schließung.

Figure 1: Illustration of erosion, dilation, opening and closing of a 2D point set. Erosion and dilation are dual, but not inverse. Since the operations are nonlinear, the order of application is important. The same holds for opening and closing.

Rekonstruktion von W aus den abgetasteten Daten $W \oplus S$ tatsächlich $W \bullet S$.

Bisher ist die Diskussion rein mengentheoretisch gewesen. Ein reales Tastschnittgerät liefert jedoch ein Höhsignal $w(x)$. Wie aber kann dieses Signal innerhalb des mengentheoretischen Rahmens gehandhabt werden? Die Antwort ist relativ einfach. Da $w(x)$ die Form des Werkstücks beschreibt, wird angenommen, dass alle Punkte (x, z) „unterhalb“ der Kurve $w(x)$ die zugehörige Punktmenge W bilden – die so genannte Umbra $U\{w(x)\}$; vgl. Bild 2. Der „Top-of“-Operator $T\{\}$ ist invers zu $U\{\}$. $T\{W\}$ liefert die obere Oberfläche einer Punktmenge W in z -Richtung. Um Signale $w(x)$ mittels morphologischer Methoden verarbeiten zu können, muss daher zunächst $w(x)$ mit dem Operator $U\{w(x)\}$ in eine Punktmenge transformiert werden. Danach können morphologische Operationen durchgeführt werden, und schließlich wird die resultierende Punktmenge unter Anwendung des $T\{\}$ -Operators in ein Signal zurücktransformiert. Insbesondere jedoch im Falle zweidimensionaler Signale $w(x, y)$ ist dieser Ansatz ungeeignet, da dann die zugehörigen Punktmenge dreidimensional sind, was einen hohen Speicher- und Rechenaufwand mit sich bringen würde.

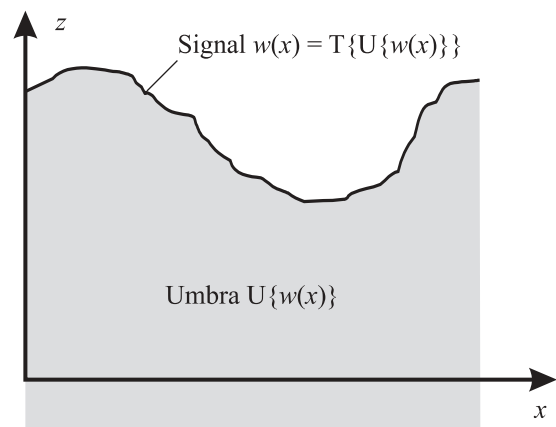


Bild 2: Darstellung der Verbindung zwischen dem „Top-of“-Operator $T\{\}$ und dem Umbra-Operator $U\{\}$.

Figure 2: Illustration of the interconnection between the top-of operator $T\{\}$ and the umbra operator $U\{\}$.

Glücklicherweise zeigt eine detaillierte Analyse, dass einfache signalbezogene Operationen gefunden werden können, die zu den mengenbezogenen Operationen äquivalent sind [2]. Im Hinblick auf die Signale selbst erhält man für die Erosion und die Dilatation:

$$w(x) \ominus s(x) = T \{U\{w\} \ominus U\{s\}\} = \min_{\xi \in D_s} \{w(x + \xi) - s(\xi)\}, \tag{1}$$

$$w(x) \oplus s(x) = T \{U\{w\} \oplus U\{s\}\} = \max_{\xi \in D_s} \{w(x - \xi) + s(\xi)\}, \tag{2}$$

wobei D_s die Trägermenge von $s(x)$ bezeichnet.

Auf der Grundlage von Erosion und Dilatation können nun auch Öffnung und Schließung für Signale selbst formuliert werden. Man befindet sich damit in der günstigen Situation, sowohl über eine mengenorientierte als auch über eine signalorientierte Darstellung für die grundsätzlichen morphologischen Operationen zu verfügen. Erstere dient als nützliches Denkinstrument, das dazu beiträgt, einen tieferen Einblick zu bekommen und um intuitiv spezialisiertere Operationen zu konstruieren. Die zweite zeichnet sich durch eine geringe algorithmische Komplexität aus und kann leicht auf einem Digitalrechner implementiert werden.

Nachdem erläutert wurde, wie Punktmengen und Signale zusammenhängen, soll ein zweiter Blick auf die Operationen Öffnung und Schließung geworfen werden. Man kann zeigen, dass beide Operationen idempotent [2] sind, d. h.:

$$(w(x) \circ s(x)) \circ s(x) = w(x) \circ s(x), \tag{3}$$

$$(w(x) \bullet s(x)) \bullet s(x) = w(x) \bullet s(x). \tag{4}$$

Diese bemerkenswerte Eigenschaft bedeutet, dass eine Filterung durch Öffnung oder Schließung die beabsichtigte Aufgabe in einem Schritt vollständig erledigt. Es besteht also keine Notwendigkeit, dasselbe Filter ein zweites Mal anzuwenden, etwa um das Ergebnis zu verbessern. Die Glättung in Bezug auf eine bestimmte Skala, die sowohl durch die Größe als auch durch die Form des strukturierenden Elements $s(x)$ festgelegt wird, wird in einem einzigen Schritt perfekt ausgeführt.

Es sei angemerkt, dass lineare Filter in der Regel diese Eigenschaft nicht besitzen. Nur wenn die Fouriertransformierte ihrer Impulsantwort – die sog. Übertragungsfunktion – ausschließlich die Werte 0 und 1 hat, bewirkt eine wiederholte Anwendung des Filters, die gleichbedeutend mit einer wiederholten Multiplikation der Übertragungsfunktion mit sich selbst ist, keinen weiteren Effekt. Leider können derartige ideale lineare Filter in der Praxis nicht realisiert werden.

3 Oberflächencharakterisierung

3.1 Abtastung und Rekonstruktion der Oberfläche

Bei der taktilen Oberflächenvermessung wird der Einfluss der Form der Tastnadelspitze herkömmlicherweise basierend auf geometrischen Überlegungen beschrieben. Um das wahre Profil $w(x)$ aus dem abgetasteten scheinbaren Profil $w(x) \oplus s(x)$ zurückzugewinnen, wurden numerische Differentiationstechniken vorgeschlagen [3]. Dies setzt ein parametrisches Modell der Tastnadelspitze voraus und erfordert außerdem, dass ihr Profil $s(x)$ differenzierbar ist. Daher ist diese Methode schwer anwendbar, wenn die Tastnadel verformt ist oder ihre Form empirisch bestimmt wurde. Darüber hinaus wird, wenn die tatsächlichen Kontaktpunkte außerhalb der Trajektorienebene der Tastnadel liegen,

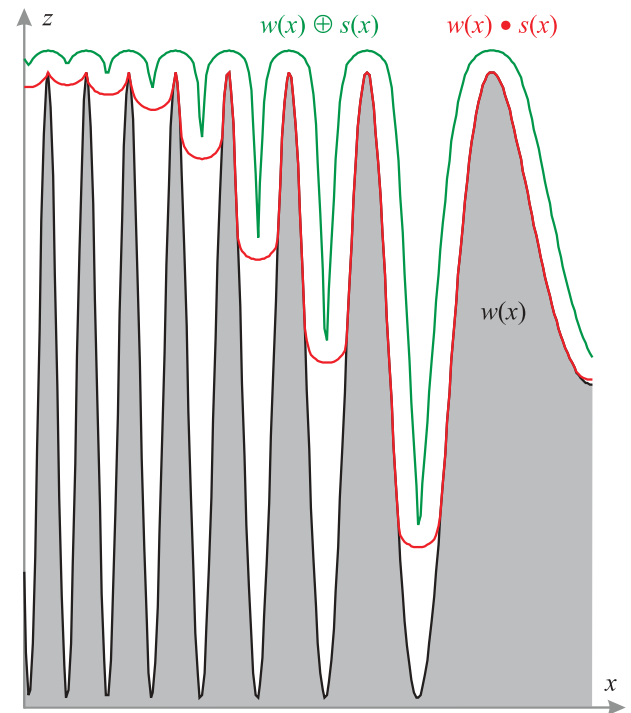


Bild 3: Effekt des Abtastens einer Oberfläche $w(x)$ mit einer kugelförmigen Tastspitze. Die Oberfläche weist ausgeprägte Strukturen unterschiedlicher räumlicher Frequenzen auf, um den Effekt deutlicher zu veranschaulichen.

Figure 3: Effect of sampling a surface $w(x)$ with a tip ball. The surface shows pronounced structures of different spatial frequencies to illustrate the effect more clearly.

das Problem dreidimensional und damit schwieriger zu lösen. Schließlich ist diese Methode aufgrund der Differentiation durch eine hohe Rauschempfindlichkeit gekennzeichnet.

Innerhalb des vorgestellten morphologischen Rahmens wird die mechanische Abtastung durch eine Dilatation der wahren Oberfläche beschrieben, die das scheinbare Profil $w(x) \oplus s(x)$ ergibt; vgl. Bild 3. Infolge des Ab tastens gehen feine Täler unwiderruflich verloren, während feine Peaks derselben Größe verdickt werden und somit durch eine spätere Erosion mit einem strukturierenden Element derselben Größe und Form wie die Tastnadelspitze zurückgewonnen werden können. Um die im Signal $w(x) \oplus s(x)$ enthaltene Information zu bewahren, muss ferner das Ab tasttheorem der digitalen Morphologie erfüllt sein [4]. Dieses Theorem steht in einem ähnlichen Bezug zur Morphologie wie Shannons Ab tasttheorem zur linearen Systemtheorie, und es gibt Auskunft über die benötigte räumliche Ab tastfrequenz, um das scheinbare Profil $w(x) \oplus s(x)$ bei einer gegebenen Tastnadelform $s(x)$ verlustfrei zu digitalisieren. Wenn die Ab tastspitze z. B. kugelförmig ist, verlangt das Ab tasttheorem nach einem Ab tastintervall kleiner als der Radius r der Spitze.

Auch wenn Erosion und Dilatation nur duale Verfahren sind, werden sie unter bestimmten Voraussetzungen sogar invers, d. h. eine Verkettung beider Operationen liefert dann wieder die Originaldaten. In solchen Fällen ist eine perfekte Rekonstruktion des wahren Profils $w(x)$ möglich. Bei einer kugelförmigen Tastnadelspitze muss dafür die minimale Oberflächenkrümmung größer als die Krümmung der Ab tastkugel sein. Anderenfalls liefert eine Erosion der Ab tastdaten $w(x) \oplus s(x)$ immer noch die beste Schätzung von $w(x)$ [4]:

$$v(x) := \hat{w}(x) = (w(x) \oplus s(x)) \ominus s(x) = w(x) \bullet s(x). \quad (5)$$

Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist, dass er auch bei Tastspitzen mit willkürlicher 3D-Form leicht anwendbar ist. So muss die Geometrie der Tastspitze nicht notwendigerweise modelliert werden, sondern sie kann auch gemessen werden, um die Rekonstruktion durchzuführen. Des Weiteren liefert der Ansatz auch in Gegenwart von Rauschen allgemein bessere Ergebnisse, da die Rekonstruktion keinerlei Differentiation beinhaltet. Schließlich sei noch erwähnt, dass eine Rekonstruktion mittels Erosion prinzipiell auch auf Oberflächendaten angewandt werden kann, die mit anderen Messverfahren – wie beispielsweise Rastersondenmikroskopie, Interferenzmikroskopie, Elektronenmikroskopie sowie bei anderen bildgebenden Verfahren – gemessen wurden, wobei in solchen Fällen sowohl das strukturierende Element als auch die Rekonstruktionsbedingungen unterschiedlich ausfallen können.

3.2 Oberflächenfilterung

Wie bereits in Abschnitt 1 angesprochen, kann Morphologie auch für die Oberflächenanalyse angewandt werden, z. B. um Rauheit, Welligkeit und Form des gemessenen Signals zu trennen. Dies wird normalerweise mit linearen Methoden, die auf einer Spektralzerlegung basieren, durchgeführt [5], was nicht nur impliziert, den mengentheoretischen Rahmen aufzugeben zu müssen, sondern auch ungünstig ist, da die gemessene Oberfläche $w(x) \bullet s(x)$ gewöhnlich nicht bandbegrenzt ist.

Ein weiterer Nachteil linearer Filter ist der, dass wenn sie benutzt werden, um die Welligkeit zu extrahieren oder um eine Referenzoberfläche zu berechnen, die Filterergebnisse eine Mittelung des Signals mit sich bringen, diese jedoch nicht notwendigerweise mit der Funktion des Werkstücks verknüpft ist [6]. Insbesondere Fragen, die Passungen, Gleiten und Reibung betreffen, sind eine Frage des Zusammenspiels von Punktmengen und können daher besser morphologisch beschrieben werden. Um z. B. die Passeigenschaften von zwei Werkstücken zu analysieren, sollte deren Manteloberfläche in Betracht gezogen werden, denn das Passverhalten wird von den höchsten Peaks bestimmt. Ein lineares Mittellinienfilter würde jedoch derartige Peaks abschwächen und somit wertvolle Nutzinformation zerstören. Eine Methode, um die Umhüllende zu bestimmen, besteht darin, die Oberfläche mit einer groben Tastnadel abzutasten. Tatsächlich können einige der wesentlichen Eigenschaften bezüglich Kontaktflächen extrahiert werden, indem man die Oberfläche mit Tastnadeln unterschiedlicher Größe abtastet, die wiederum mittels Schließungen bei verschiedenen Skalen beschrieben werden können.

Da das wahre Profil $w(x)$ in der Regel unbekannt ist, muss die im Folgenden vorgestellte Signalanalyse notwendigerweise auf seiner Schätzung $v(x)$ basieren. Führt man wiederholte Schließungen von $v(x)$ mit strukturierenden Elementen $s_n(x)$ mit größer werdenden Radien r_n durch, so erhält man die in Bild 4(a) dargestellte Skalenraumdarstellung. Die verschiedenen Signale $v \bullet s_n$ kann man sich als Topographien vorstellen, die mit Tastspitzen unterschiedlicher Größe abgetastet wurden. Durch Berechnung der Differenz von Signalen, die sich in benachbarten Skalen des Schließungs-Skalenraumes befinden, wird eine Zerlegung in die verschiedenen Täler, die am Aufbau des Signals $v(x)$ beteiligt sind, abhängig von der Skala erhalten; siehe Bild 4(b). Die resultierende Skalenraumdarstellung ist nach der morphologischen Bottom-Hat-Transformation benannt, die oft dazu verwendet wird, um feine Täler zu erkennen:

$$b(x) := v(x) - (v(x) \bullet s(x)). \quad (6)$$

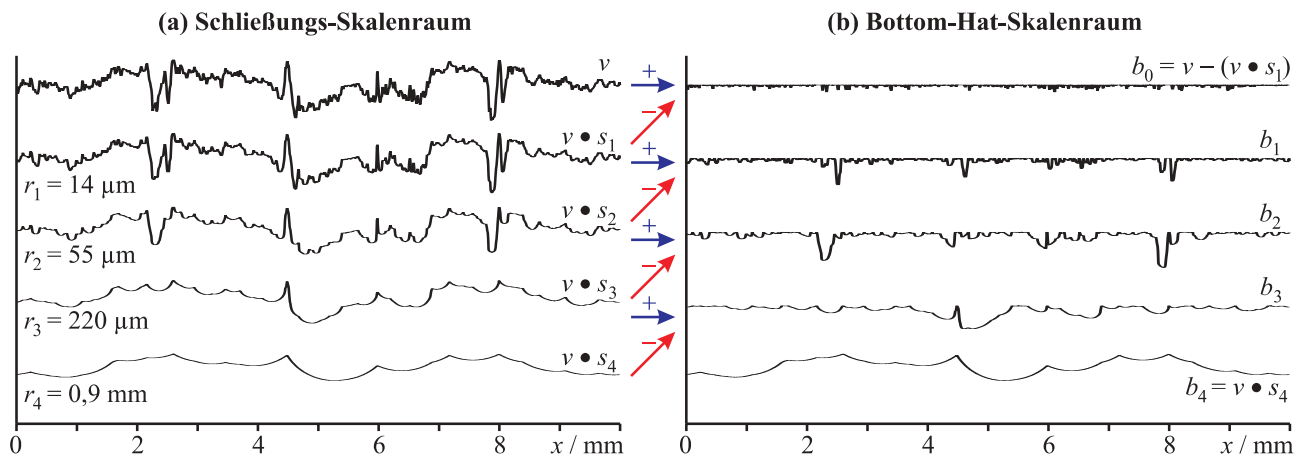


Bild 4: Skalenraumdarstellung eines abgetasteten Topographiesignals $v(x) = w(x) \bullet s(x)$: (a) Erzeugung eines Schließungs-Skalenraums durch wiederholte Schließungen mit kugelförmigen strukturierenden Elementen zunehmender Radien r_n ; (b) Erzeugung eines Bottom-Hat-Skalenraumes durch Berechnung von Signaldifferenzen bei benachbarten Skalen eines Schließungs-Skalenraums.

Figure 4: Scale space representations of a sampled topography signal $v(x) = w(x) \bullet s(x)$: (a) construction of a closing scale space by repeated closings by spherical structuring elements of increasing radii r_n ; (b) construction of a bottom-hat transform scale space by computing differences of signals at adjacent scales of a closing scale space.

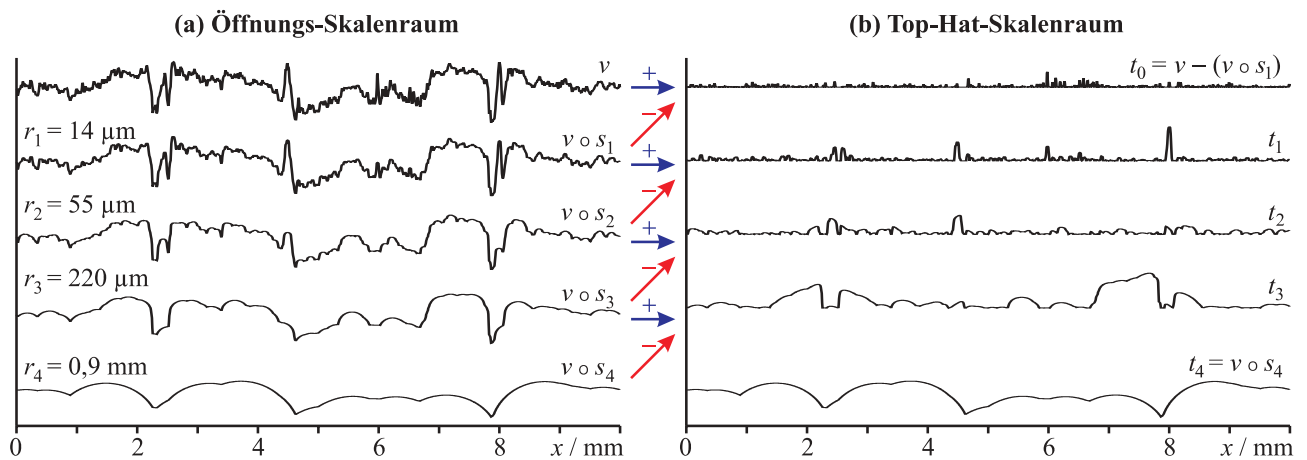


Bild 5: Skalenraumdarstellung eines abgetasteten Topographiesignals $v(x) = w(x) \bullet s(x)$: (a) Erzeugung eines Öffnungs-Skalenraums durch wiederholte Öffnungen mit kugelförmigen strukturierenden Elementen zunehmender Radien r_n ; (b) Erzeugung eines Top-Hat-Skalenraumes durch Berechnung von Signaldifferenzen bei benachbarten Skalen eines Öffnungs-Skalenraums.

Figure 5: Scale space representations of a sampled topography signal $v(x) = w(x) \bullet s(x)$: (left) construction of an opening scale space by repeated openings by structuring elements of increasing radii r_n ; (right) construction of a top-hat transform scale space by computing differences of signals at adjacent scales of an opening scale space.

Die Darstellung in Bild 4(b) ist besonders nützlich, um das Volumen und die Form von Oberflächenhöhlräumen, die z. B. als Ölreservoirs dienen, bei verschiedenen Skalen zu analysieren.

Eine weitere funktionsrelevante Auswertung betrifft die Verteilung von Oberflächenpeaks, von denen in manchen Anwendungen Reibung und Verschleiß abhängen. Für eine angemessene Analyse derartiger Strukturen könnte man einen negativen Abdruck der Oberflächentopographie mit einer Tastnadelspitze einer bestimmten Größe gewinnen, was einer Abtastung der Oberflächentopographie von unten entspräche. Erfreulicherweise kann diese Filterung leichter mittels einer morphologischen Öffnung erzielt werden. Die Skalenraumdarstellung in Bild 5(a) zeigt den Effekt dieses Filters im Zusammenhang mit strukturierenden Elementen verschiedener Radien r_n . Die Differenz von Signalen bei nebeneinander liegenden Skalen führen zu einer Zerlegung, die das Signal $v(x)$ als eine Überlagerung von Peaks bei verschiedenen Skalen beschreibt; vgl. Bild 5(b). Diese Darstellung ist nach der morphologischen Top-Hat-Transformation benannt, die allgemein dazu verwendet wird, feine Peaks zu detektieren:

$$t(x) := v(x) - (v(x) \circ s(x)). \quad (7)$$

Man beachte, dass

$$v(x) = \sum_i b_i(x) = \sum_i t_i(x) \quad (8)$$

gilt; vgl. Bilder 4(b) und 5(b).

Da Öffnung und Schließung nichts anderes als die Wirkung der Oberflächenabtastung von oben bzw. von unten darstellen, ermöglichen die dazugehörigen Skalenräume eine klare und funktionsorientierte Analyse der Oberflächentopographie. Darüber hinaus wird mit den Hat-Transformationen eine wertvolle Zerlegung sowohl der Hohlräume als auch der Peaks in verschiedene Skalen erzielt.

4 Schlussfolgerungen

Es wurde gezeigt, dass Morphologie einen natürlichen und geeigneten mathematischen Rahmen zur Verfügung stellt, um die Wirkung mechanischen Abtastens in der dimensionellen und in der Rauheitsmesstechnik zu beschreiben sowie um 3D-Oberflächendaten zu filtern. Die gemessene Topographie entspricht der morphologischen

Dilatation des wahren Profils mit einem strukturierenden Element der Größe und Form der Tastnadelspitze. Um eine gute Schätzung der wahren Oberfläche zu erhalten, muss eine morphologische Erosion des gemessenen Profils durchgeführt werden. Da diese Operationen eine nichtlineare Filterung darstellen, kann weder eine Frequenzcharakteristik für das Filter noch eine Grenzfrequenz angegeben werden. Auch darf der Effekt der mechanischen Abtastung nicht anhand einer linearen Faltung beschrieben werden [7]. Stattdessen arbeiten morphologische Filter mit einem strukturierenden Element, mit dem das Signal geometrisch von oben oder von unten abgetastet wird. Öffnung und Schließung können als Wiederholungen von Abtastungen mit mathematischen Tastnadeln betrachtet werden, deren Größe und Form durchaus mit einfachen geometrischen Überlegungen definiert werden können.

Danksagung

Die Autoren danken Frau Gaby Gross für wertvolle Hinweise. Ihr Dank gilt gleichermaßen Herrn Nikolai Aljuri, PhD, für die Bereitstellung von Testbildern.

Literatur

- [1] Serra, J.: *Imaging Analysis and Mathematical Morphology – Vol. II: Theoretical Advances*, Academic Press, London, 1988.
- [2] Haralick, R. M.; Sternberg, S. R.; Zhuang, X.: *Image analysis using mathematical morphology*, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence 9 (1987) 4, S. 532–550.
- [3] Lonardo, P. M.; Lucca, D. A.; De Chiffre, L.: *Emerging Trends in Surface Metrology*, Annals of the CIRP 51 (2002) 2, S. 701–723.
- [4] Haralick, R. M.; Zhuang, X.; Lin, C.; Lee, J. S. J.: *The Digital Morphologic Sampling Theorem*, IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing 37 (1989) 12, S. 2067–2090.
- [5] Lonardo, P. M.; Trumpold, H.; De Chiffre, L.: *Progress in 3D Surface Microtopography Characterization*, Annals of the CIRP 46 (1996) 2, S. 589–598.
- [6] Dietzsch, M.; Krystek, M.; Meyer, M.: *Bestmögliche Annäherung*, Messen und Prüfen 46 (2001), S. 602–607.
- [7] Weckenmann, A.; Wiedenhöfer, T.; Sommer, K.-D.: *Messunsicherheitsbestimmung in der Nanotechnologie am Beispiel eines Nanoclusters*, Technisches Messen 71 (2004) 2, S. 93–100.



Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León leitet das Fachgebiet Verteilte Messsysteme an der Technischen Universität München.

Hauptarbeitsgebiete: Mess- und Automatisierungstechnik, Signalverarbeitung, automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung, Mustererkennung, Datenübertragung

und Informationsfusion.

Adresse: Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Technische Universität München, Theresienstr. 90/N5, 80333 München, Tel.: +49-89-289 23350, Fax: +49-89-289 23347, E-Mail: f.puente@tum.de



Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer leitet das Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB) sowie den Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme an der Universität Karlsruhe (TH).

Hauptarbeitsgebiete: Bildverarbeitung und automatische

Sichtprüfung, Automatisierungstechnik, Mustererkennung, Informationstheorie, Robotik und Messtechnik.

Adresse: Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB sowie Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Universität Karlsruhe (TH), Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe, Tel.: +49-721-6091 210, Fax: +49-721-6091 556, E-Mail: jbe@iitb.fraunhofer.de