

# Technische Universität Chemnitz-Zwickau

## IX. Internationales Oberflächenkolloquium

29. bis 31. Januar 1996

### Vorträge

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK  
HANNOVER  
TECHNISCHE  
INFORMATIONSBIBLIOTHEK

#### Veranstalter:

Institut für Fertigungsmeßtechnik und Qualitätssicherung i.G.  
Freundeskreis Fertigungsmeßtechnik und Qualitätssicherung  
der Technischen Universität Chemnitz

#### Wissenschaftliche Leitung:

Prof. Dr.-Ing. M. Dietzsch  
Prof.(em) Dr. Dr. H. Trumpold

UB/TIB Hannover 89  
114 028 451



TOC

# Moderne Methoden der Signalverarbeitung zur Welligkeitsmessung durch Abgrenzung des Welligkeitsanteils gegenüber Rauheit und Form

Dr.-Ing. H. Bodschinna, Dipl.-Ing. J. Seewig

Institut für Meß- und Regelungstechnik im Maschinenbau, Universität Hannover

## 1. Einleitung

Der hohe Wettbewerbsdruck in vielen Bereichen des Maschinenbaus führt zu immer höheren Anforderungen an die Werkstück- oder Produktqualität bei gleichzeitiger Reduzierung der Produktionskosten. Die Funktionstauglichkeit der Werkstücke und der dazu erforderliche Fertigungsaufwand werden im wesentlichen durch die Toleranzvorgaben für die Gestaltabweichungen der Werkstücke bestimmt. Um die Qualität und damit die Funktionstauglichkeit der Bauteile gewährleisten zu können, werden in zunehmendem Maße sehr differenzierte Auswerteverfahren benötigt, die eine exakte Trennung der Gestaltabweichungen, von kurzwelligen Rauheitsanteilen, über Welligkeiten, bis hin zu langwelligen Formkomponenten, ermöglichen. Diese Auswerteverfahren sind unbedingt erforderlich, um frühzeitig in den Fertigungsprozeß eingreifen zu können und somit die Produktionskosten gering zu halten.

Da Formabweichungen durch den Einsatz verbesserter Werkzeugmaschinen wesentlich besser beherrschbar geworden sind, gewinnt der Einfluß der Welligkeit auf das Funktionsverhalten zunehmend an Bedeutung. Unter dem Begriff Welligkeit wird dabei eine annähernd periodisch wiederkehrende Gestaltabweichung verstanden, die hauptsächlich durch Schwingungen im System Werkstück - Werkzeug - Werkzeugmaschine entsteht /1,2/. Derartige Schwingungen können z.B. durch einen Werkzeugverschleiß oder die unzureichende Steifigkeit der Werkzeugmaschine hervorgerufen werden. Ziel der Welligkeitsauswertung muß es daher sein, periodische Profilkomponenten durch ihre Wellenlänge und Amplituden zu charakterisieren.

Heutzutage wird die Welligkeitsauswertung mit Hilfe von genormten Profilfiltern durchgeführt, indem zuerst eine Abtrennung der Form- und Rauheitsanteile erfolgt und anschließend einfache Kenngrößen berechnet werden. Dabei werden bestimmte Wellenlängenbereiche aus dem gemessenen Oberflächenprofil isoliert und als Welligkeitsprofil deklariert. Diese Vorgehensweise setzt jedoch voraus, daß die Welligkeit weder mit dem Bereich der kurzwelligen Rauheit noch mit dem Bereich langwelliger, durch das Oberflächenmeßgerät erfaßter Anteile der Istform überlagert ist.

In der industriellen Praxis hat sich gezeigt, daß die Trennung zwischen Welligkeit und Formkomponenten mit den genormten Profilfiltern in der Mehrzahl der Fälle nicht

möglich ist. Es kommt daher zu einer deutlichen Verzerrung des berechneten Welligkeitsprofils.

Am Institut für Meß- und Regelungstechnik im Maschinenbau der Universität Hannover wurde aufgrund dieser unbefriedigenden Situation ein neues Formfilter entwickelt. Dieses neue Formfilter besitzt alle „gewohnten“ Eigenschaften der genormten Profilter, führt jedoch nicht zu einer Verzerrung des Welligkeitsprofils durch verbleibende Formanteile. Zudem kann das Filter problemlos in die derzeit bestehende Meßgerätesoftware implementiert werden.

Aufbauend auf dem Einsatz dieser neuen Formfiltertechnik wird am Institut für Meß- und Regelungstechnik ein Auswerteverfahren erprobt, das eine differenzierte Bewertung der Welligkeit erlaubt. Ziel dieser verfeinerten Auswertemethode soll es sein, die Erkennung periodischer Welligkeitskomponenten innerhalb eines vorgegebenen Wellenlängenbereiches nach Wellenlänge, Phase und Amplitude zu ermöglichen.

## 2 Entwicklung eines mathematischen Modells einer technischen Oberfläche

Bevor eine Trennung der verschiedenen Gestaltabweichungen durch geeignete mathematische Verfahren vorgenommen werden kann, muß zunächst ein passendes Modell zur analytischen Beschreibung realer Oberflächen gefunden werden.

Derzeit ist es in der Oberflächenmeßtechnik üblich, alle Gestaltabweichungen des Oberflächenprofils als Überlagerung von Sinuswellen unterschiedlicher Wellenlänge, Phasenlage und Amplitude anzusehen. In der praktischen Anwendung hat sich jedoch gezeigt, daß dieses Modell insbesondere bei der Beschreibung von **Formanteilen** zu erheblichen Problemen führt, da diese in der Regel keinen periodischen Charakter aufweisen. Sehr viel besser läßt sich die Form realer Oberflächen durch ein geeignetes Polynom approximieren.

Auch der **Rauheitsanteil** läßt sich nur schwer durch Sinuswellen beschreiben, da beispielsweise bei spanenden Bearbeitungsverfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden überwiegend stochastische Profilanteile erzeugt werden. In der Fachliteratur werden daher Rauschprozesse zur Approximation der Rauheit vorgeschlagen /3,4/.

Ausschließlich die im Oberflächenprofil vorhandenen **Welligkeitskomponenten** lassen sich gut durch Sinuswellen darstellen, da sie der Definition zufolge, annähernd periodischen Charakter aufweisen.

Für die in diesem Beitrag beschriebene Filtermethode, wurde daher ein mathematisches Oberflächenmodell gewählt, welches auf der Überlagerung eines Polynoms mit einem periodischen Anteil und einem Rauschanteil basiert.

In Bild 1 ist unter Berücksichtigung dieses Modells die Nachbildung eines Oberflächenprofils mit einer Meßstrecke von 16mm dargestellt. Durch Addition der Profilkomponenten (Bild 1 oben) entsteht ein Oberflächenprofil mit einem Formanteil, einem Welligkeitsanteil und einem Rauheitsanteil (Bild 1 unten). Für die meisten technischen Oberflächen kann der Formanteil ausreichend genau durch ein Polynom 3. Grades modelliert werden.

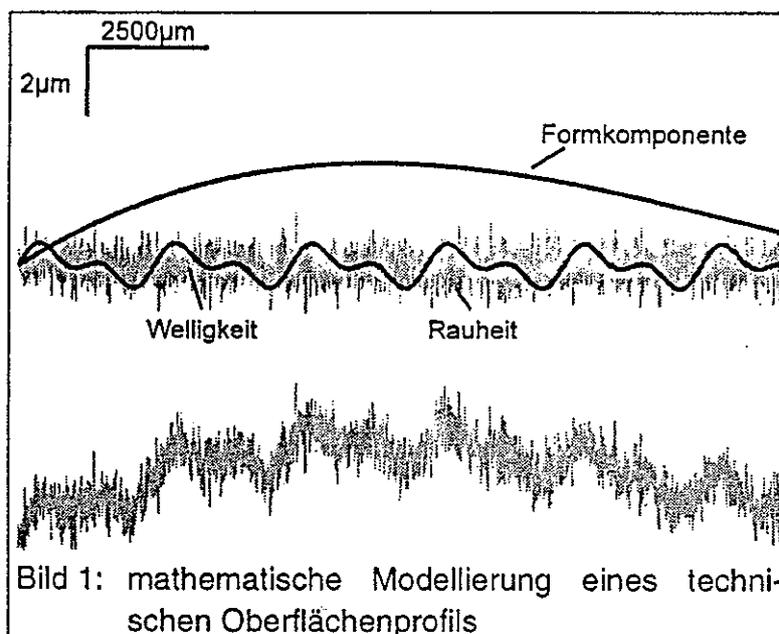


Bild 1: mathematische Modellierung eines technischen Oberflächenprofils

Allgemein läßt sich jede gemessene Oberfläche durch die folgende Gleichung<sup>1</sup> beschreiben:

$$y(x) = \underbrace{\sum_{k=0}^3 a_k \cdot x^k}_{\text{Form}} + \underbrace{\sum_k b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} \cdot x + \varphi_k\right)}_{\text{Welligkeit}} + \underbrace{u(x)}_{\text{Rauheit}} \quad (1)$$

### 3 Die Grundgleichung der Formfilterung

Ein exakt arbeitendes Formfilter muß in der Lage sein, aus einem (z.B. in Bild 1 gezeigten) Oberflächenprofil den Formanteil so zu eliminieren, daß die überlagerten Profilanteile, wie Welligkeit und Rauheit, unbeeinflusst bleiben. Der grundlegende Aufbau eines solchen Formfilters ist in Bild 2 dargestellt.

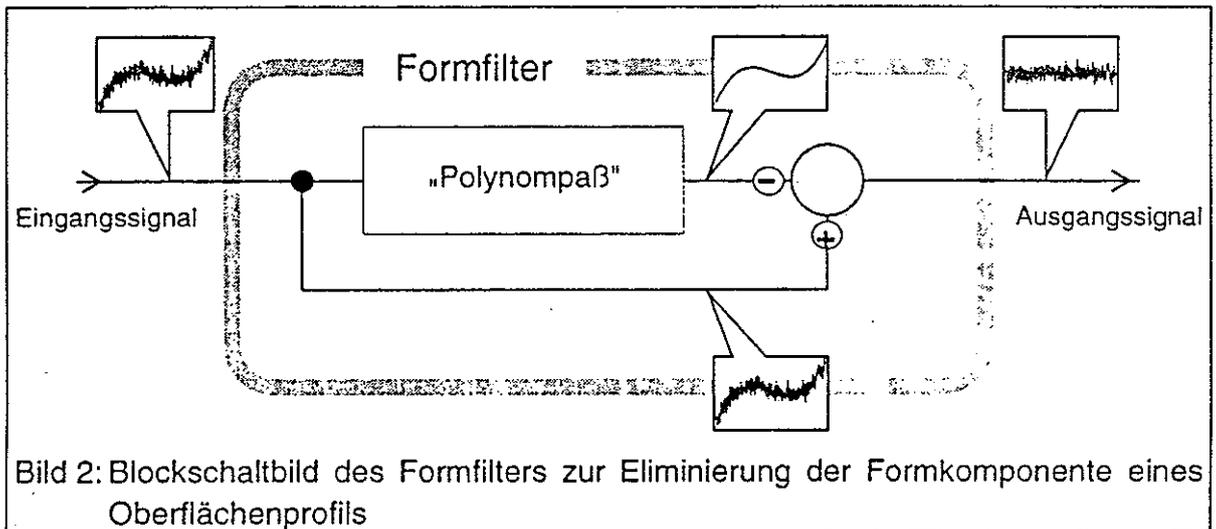
Wesentlicher Bestandteil des Filters ist ein Tiefpaß, der die Formkomponente des Oberflächenprofils ungedämpft durchläßt, während er den Welligkeitsanteil und den Rauheitsanteil unterdrückt.

Das Ausgangssignal des Formfilters berechnet sich durch Subtraktion des tiefpaßgefilterten Eingangssignals vom ungefilterten Eingangssignal. Dadurch wird die

<sup>1</sup>

x	Meßstrecke des Oberflächenprofils in mm
y(x)	Ordinaten des Oberflächenprofils in mm
a <sub>k</sub>	Polynomkoeffizienten des Formanteils in mm <sup>1-k</sup>
b <sub>k</sub>	Amplitude des Welligkeitsanteils in mm
λ <sub>k</sub>	Wellenlänge des Welligkeitsanteils in mm
φ <sub>k</sub>	Phase des Welligkeitsanteils
u(x)	Rauheit (mittelwertfreies gaußverteiltes Rauschen) in mm

Formkomponente vollständig eliminiert, während Welligkeit und Rauheit weiterhin im Ausgangssignal enthalten bleiben. Weil der Tiefpaß keine Filterwirkung hinsichtlich der Formkomponente aufweist, soll er im folgenden als „Polynompfaß“ bezeichnet werden.



Da die Auswertung der Oberflächenprofile digital erfolgen soll, ist es notwendig, alle weiteren Betrachtungen am abgetasteten Oberflächenprofil vorzunehmen. Dazu wird die Meßstrecke  $x$  durch äquidistante Stützstellen  $n \Delta x$  ersetzt.

Die Grundlage der digitalen Tiefpaßfilterung ist die Bestimmung einer Gewichtsfunktion. Diese gibt an, mit welchem Gewicht die benachbarten Stützstellen (Profilpunkte des ungefilterten Oberflächenprofils) in die Mittelwertbildung zur Bestimmung eines Punktes der Filterlinie eingehen. Im Fall des „Polynompasses“ muß dementsprechend eine Gewichtsfunktion gefunden werden, bei der die Mittelwertbildung keinen Einfluß auf die Formkomponente ausübt. Mathematisch läßt sich dieser Zusammenhang durch die nachfolgende Gleichung angeben:

$$\sum_{i=0}^3 a_i \cdot [n \cdot \Delta x]^i = \sum_k \sum_{i=0}^3 a_i \cdot [(n+k) \cdot \Delta x]^i \cdot g_3[k] \quad (2)$$

Ausgangssignal      Eingangssignal      Gewichtsfunktion

An den Eingang des „Polynompasses“ wird als Signal ein Polynom 3. Grades angelegt, das nach Gleichung (1) die Formkomponente nachbildet. Am Ausgang des „Polynompasses“ muß nun trotz Mittelwertbildung mit der Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  das unveränderte Eingangssignal erscheinen. Jede Gewichtsfunktion  $g_3[k]$ , die Gleichung (2) erfüllt, besitzt also die Eigenschaft eines „Polynompasses“ und kann gemäß Bild 2 für eine Formfilterung verwendet werden.

Auf die Welligkeits- und Rauheitsanteile, die nach Gleichung (1) nicht durch ein Polynom 3. Grades beschrieben werden, wirkt der „Polynompfaß“ wie ein herkömmliches digitales Tiefpaßfilter mit einer zugehörigen charakteristischen Grenzwellenlän-

ge. Als Grenzwellenlänge wird die Länge der Sinuswelle definiert, die noch mit 50% der Amplitude durch das Tiefpaßfilter übertragen wird.

Durch einen Vergleich der Polynomkoeffizienten  $a_i$ , kann anstelle der Gleichung (2) ein vereinfachtes Gleichungssystem zur Berechnung der Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  hergeleitet werden<sup>2</sup>.

### 3.1 Beispiel 1: Formfilterung durch genormte Profilfilter

Als erstes Beispiel zur Bestimmung eines „Polynompasses“ werden die in DIN 4777 genormten Profilfilter betrachtet. Sie sind fester Bestandteil der Oberflächenmeßgeräte und werden derzeit für die Trennung der unterschiedlichen Gestaltabweichungen technischer Oberflächen in der industriellen Praxis eingesetzt. Durch eine leichte Modifikation der Gewichtsfunktion  $g[k]$ , kann das Profilfilter in einen „Polynompaß“ mit der Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  überführt werden. Die Umrechnung erfolgt mit der Gleichung

$$g_3[k] = C_1 \cdot g[k] + C_2 \cdot \quad (3)$$

Die Variablen  $C_1$  und  $C_2$  sind Konstanten und lassen sich aus Kenntnis der Gewichtsfunktion  $g[k]$  auf einfache Weise berechnen<sup>3</sup>.

Durch die Anwendung von Gleichung (3) bietet sich erstmals die Möglichkeit, genormte Profilfilter für eine exakte Eliminierung der Formkomponente in Oberflächenprofilen zu verwenden.

<sup>2</sup> Für die Vereinfachung der Gleichung (2) ergibt sich in Matrixschreibweise:

$$\left[ \sum_k g_3[k] \quad \sum_k k \cdot g_3[k] \quad \sum_k k^2 \cdot g_3[k] \quad \sum_k k^3 \cdot g_3[k] \right] = G_3 \cdot X = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]. \quad (I)$$

$G_3$  ist dabei ein Zeilenvektor mit der Dimension  $1 \times n_0$  und repräsentiert vollständig die Gewichtsfunktion  $g_3[k]$ .  $X$  ist eine Matrix mit der Dimension  $n_0 \times 4$  und hängt ausschließlich von den Summationsgrenzen  $k=n_a \dots n_e$  in Gleichung (2) ab:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & n_a & n_a^2 & n_a^3 \\ 1 & n_a + 1 & (n_a + 1)^2 & (n_a + 1)^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & n_e & n_e^2 & n_e^3 \end{bmatrix}$$

$n_0$  ist die Breite der Gewichtsfunktion  $g[k]$ . Es gilt  $n_0 = n_e - n_a + 1$ .

<sup>3</sup> Die Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  berechnen sich durch Einsetzen der Gleichung (3) in Gleichung (I) zu:

$$C_1 = - \frac{\sum_k k^2}{n_0 \cdot \sum_k k^2 \cdot g[k] - \sum_k g[k] \cdot \sum_k k^2}, \quad C_2 = \frac{\sum_k k^2 \cdot g[k]}{n_0 \cdot \sum_k k^2 \cdot g[k] - \sum_k g[k] \cdot \sum_k k^2} \quad (II)$$

### 3.2 Beispiel 2: Formfilterung durch lokale Profilapproximation mit einem Polynom 2. Grades

Eine zweite, interessante Möglichkeit zur Bestimmung eines „Polynompasses“ ergibt sich, wenn die Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  durch ein Polynom 2. Grades beschrieben wird. Die Polynomkoeffizienten der Gewichtsfunktion lassen sich dann nämlich analytisch durch Lösung eines einfachen Gleichungssystems bestimmen<sup>4</sup>. Die Filterung eines Oberflächenprofils mit diesem „Polynommaß“ 2. Grades führt zu einer Filterlinie, wie sie in Bild 3 oben dargestellt ist.

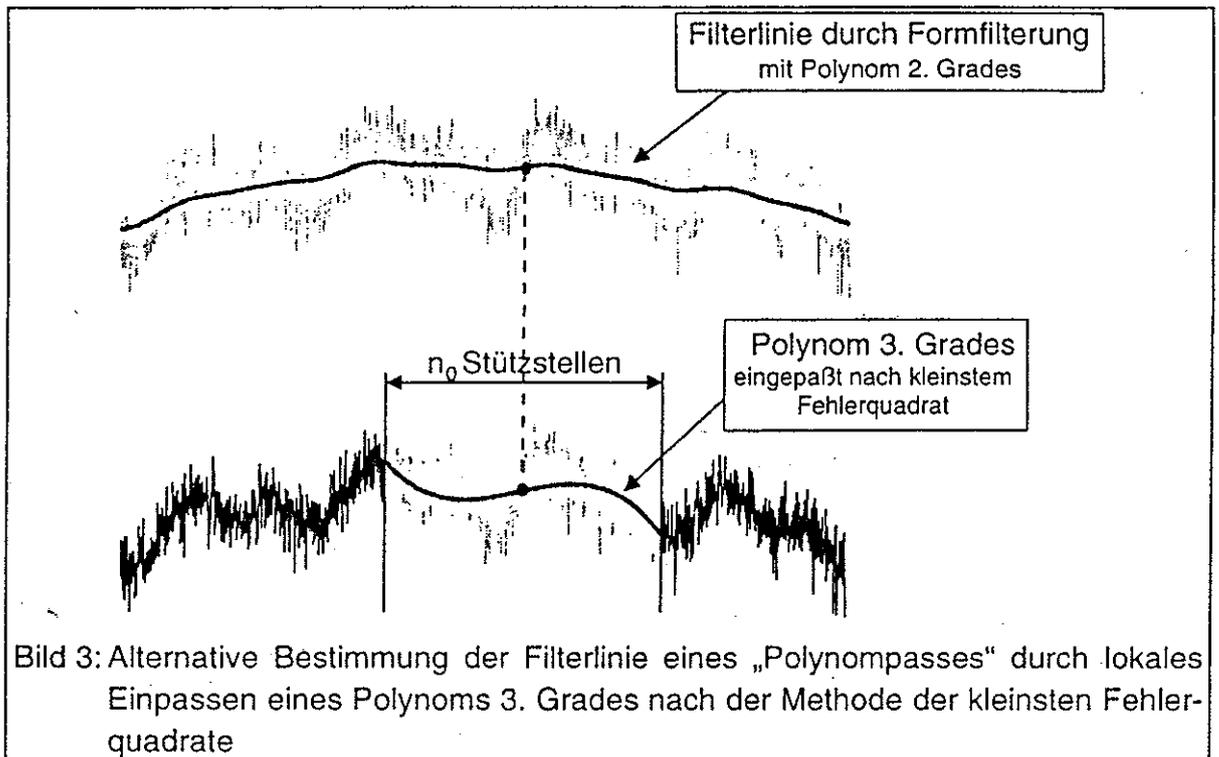


Bild 3: Alternative Bestimmung der Filterlinie eines „Polynompasses“ durch lokales Einpassen eines Polynoms 3. Grades nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Für die so berechnete Filterlinie kann eine anschaulich mathematische Interpretation angegeben werden:

Bild 3 zeigt unten den Ausschnitt eines abgetasteten Oberflächenprofils. Ein Fenster mit der konstanten Breite  $n_0$ , die identisch mit der Anzahl der Stützstellen von  $g_3[k]$  ist, wird von links nach rechts über das Oberflächenprofil geschoben. In Bild 3 ist das Fenster als grauer Bereich der Profilpunkte gekennzeichnet. Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird in das Oberflächenprofil innerhalb des Fensters ein Polynom 3. Grades eingepaßt. Der in der Mitte des Fensters liegende Punkt des

<sup>4</sup> In Matrixschreibweise ergibt sich für die Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  die allgemeine Lösung:

$$G_3 = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T. \quad (\text{III})$$

Dabei bezeichnet  $X^T$  die Transponierte von  $X$  und die Potenz  $^{-1}$  die Inverse von  $(X^T \cdot X)$ . Nach Gleichung (III) kann die Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  auch die Funktion eines Polynoms 3. Grades annehmen. Im Fall einer symmetrischen Gewichtsfunktion reduziert sich jedoch auch der Grad des Polynoms. Vgl. Kapitel 3.1.

eingepaßten Polynoms (im Bild markiert durch einen schwarzen Punkt) ist identisch mit dem Punkt der mit der Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  berechneten Filterlinie. Durch schrittweises Verschieben des Fensters ergeben sich so alle weiteren Profilpunkte der Filterlinie.

Eine Formfilterung mit dem oben beschriebenen „Polynompaß“ entspricht also einer „gleitenden“ Formapproximation des Oberflächenprofils durch ein Polynom 3. Grades nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

#### 4 Kompensation der Filtervor- und nachlaufstrecken bei der Formfilterung

Der wesentliche Nachteil eines digitalen Filters ist, daß seine Filterlinie durch Ein- und Ausschwingvorgänge stark verzerrt wird. Die Subtraktion von Oberflächenprofil und Filterlinie bei der Formfilterung führt daher ebenfalls zu einer Verzerrung des Differenzprofils und damit zu einem Verlust an auswertbaren Profilpunkten durch Filtervor- und nachlaufstrecken. In Bild 4 wird deutlich, daß der erste gültige Punkt der Filterlinie erst dann berechnet werden kann, wenn die Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  vollständig im Profil liegt und damit erstmals alle Stützstellen der Gewichtsfunktion in die Mittelwertbildung eingehen.

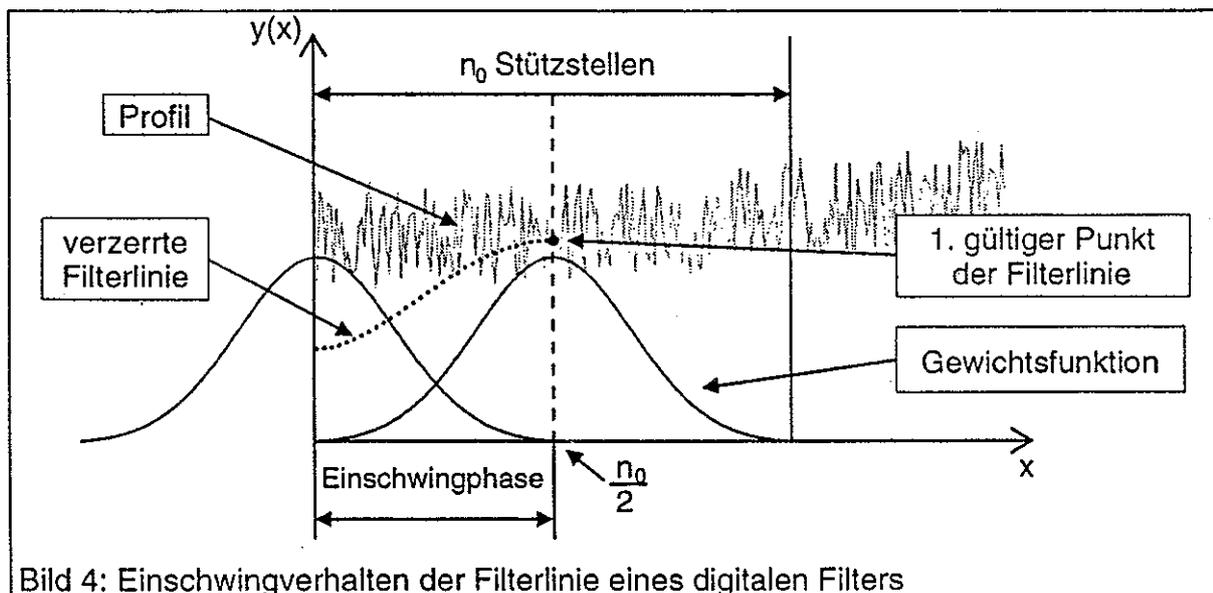


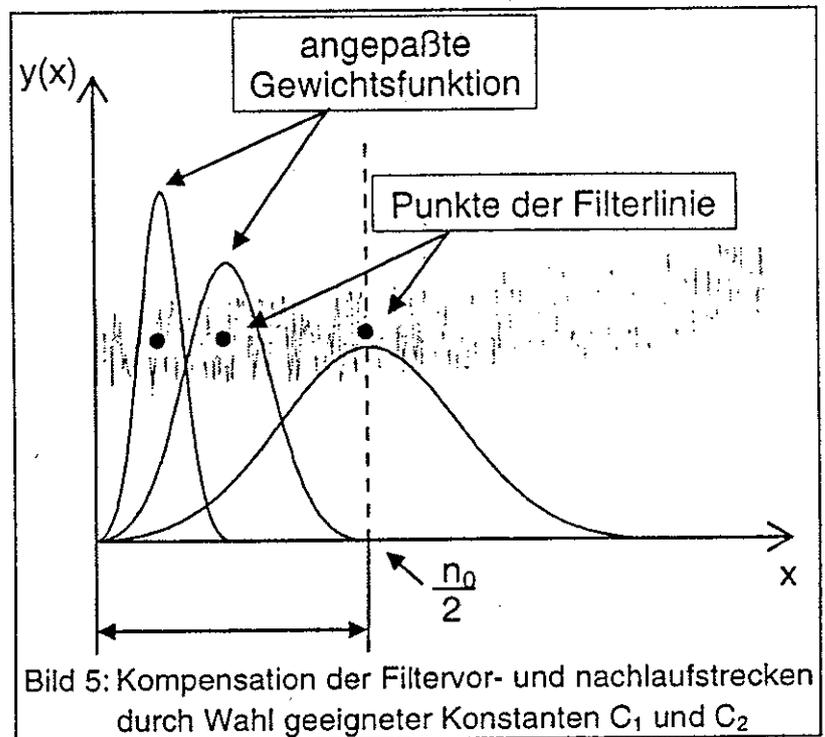
Bild 4: Einschwingverhalten der Filterlinie eines digitalen Filters

Im Fall des neu entwickelten Formfilters sind verschiedene Möglichkeiten zur Kompensation der Vor- und Nachlaufstrecken möglich. In diesem Abschnitt soll nun ein sehr „robustes“ Verfahren vorgestellt werden, das ohne Einschränkung für alle Formfilter mit der Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  Gültigkeit hat:

Betrachtet wird dazu in Bild 5 die symmetrische Gewichtsfunktion  $g[k]$  eines genormten Profilfilters, die durch Berechnung der Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  (Abschnitt 3.1) in den „Polynompaß“ mit der Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  überführt wird. Im Bereich der Filtervor- und nachlaufstrecke können die Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  nun so gewählt wer-

den, daß sich die Breite der Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  verringern läßt, ohne die Eigenschaft eines „Polynompasses“ zu verlieren. Auf diese Weise eliminiert das Formfilter die Formkomponente über die gesamte Breite des Oberflächenprofils.

Bei Anwendung dieser Methode muß jedoch berücksichtigt werden, daß die Verringerung der der Breite der Gewichtsfunktion  $g_3[k]$  eine Verringerung der Grenzwellenlänge des „Polynompasses“ zur Folge hat und somit Welligkeitsanteile als auch Rauheitsanteile an den Rändern des Oberflächenprofils durch das Formfilter gedämpft werden. Vorteilhaft an dieser Methode ist, daß sie sich in der praktischen Anwendung als äußerst „robust“ erweist, da die Filterlinie des Formfilters in der Mitte des Oberflächenprofils verläuft und keine Verzerrungen der Filterlinie zu erwarten sind.



## 5 Berechnung des Welligkeitsprofils einer realen Oberfläche mit starkem Formanteil

In diesem Abschnitt soll die unterschiedliche Filterwirkung der genormten Profilfilter und des neu entwickelten Formfilters am Beispiel eines real berechneten Welligkeitsprofils gezeigt werden. In Bild 6 oben ist das Oberflächenprofil mit einer Meßstrecke von 16mm dargestellt. Der starke Formanteil, der dem Oberflächenprofil überlagert ist, soll einerseits durch die Filterlinie des genormten Profilfilters und andererseits durch die Filterlinie des „Polynompasses“ approximiert werden. Die Breite der zugehörigen Gewichtsfunktionen wurde dabei so gewählt, daß sich eine Filtergrenzwellenlänge von 8mm ergibt. Für die Berechnung der Filterlinie des „Polynompasses“ wird außerdem das in Abschnitt 4 vorgestellte Kompensationsverfahren für Filtervor- und nachlaufstrecken eingesetzt.

In Bild 6 sind für beide Filterlinien die Differenzprofile mit den verbleibenden Welligkeits- und Rauheitsanteilen dargestellt. In Bild 6 links ist das durch Formfilterung entstandene Differenzprofil zu sehen, daß keine Formanteile mehr aufweist und alle Profilmomente für weitere Berechnungen zur Verfügung stellt.

Dagegen ist in dem durch die genormte Profilfilterung berechneten Differenzprofil (Bild 6 r.), eine deutliche Tendenz zu erkennen, die durch eine unzureichende Eliminierung der Formkomponente hervor-

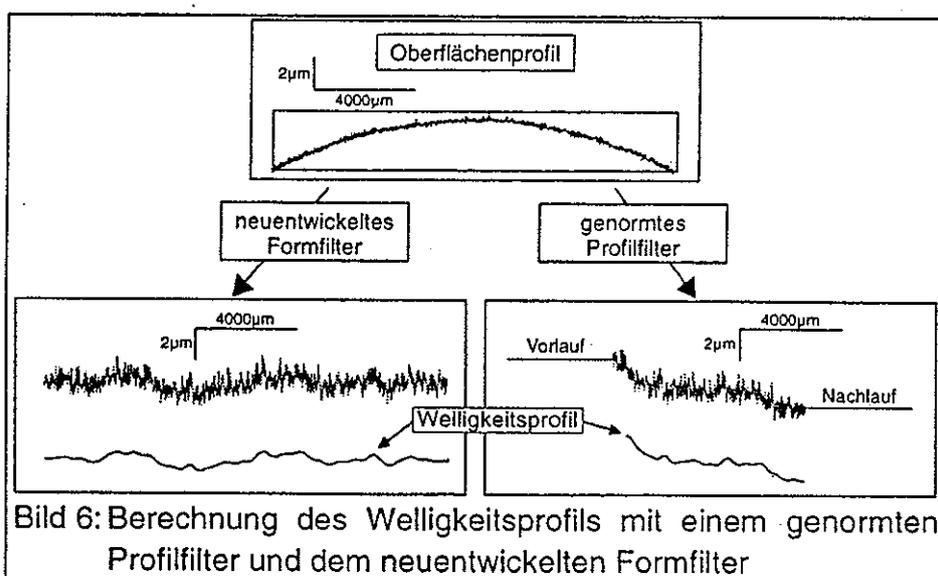


Bild 6: Berechnung des Welligkeitsprofils mit einem genormten Profilfilter und dem neuentwickelten Formfilter

gerufen wird. Außerdem tritt durch die Ein- und Ausschwingvorgänge der Filterlinie an den Profilrändern ein deutlicher Verlust an auswertbarer Meßstrecke auf.

Die Trennung zwischen Welligkeit und Rauheit erfolgt in beiden Fällen durch ein genormtes Profilfilter mit der unteren Grenzwellenlänge 0.8mm. Die extreme Profilverzerrung, die durch die verbleibende Formkomponente (Bild 6 rechts) hervorgerufen wird, macht eine weitere Verwendung des Welligkeitsprofils unmöglich. Problemlos auswerten läßt sich dagegen das auf Basis des Formfilters berechnete Welligkeitsprofil (Bild 6 links).

An diesem Beispiel wird deutlich, daß die Anwendung eines „Polynompasses“ zur Approximation der Formkomponente technischer Oberflächen gegenüber den genormten Profilfiltern deutliche Vorteile besitzt.

## 6 Differenzierte Welligkeitsauswertung

Mit einer differenzierten Bewertung der Welligkeitskomponente soll die Möglichkeit gegeben werden, periodische Profilanteile innerhalb eines vorgegebenen Wellenlängenbereiches zu erkennen und nach Wellenlänge, Phase und Amplitude zu berechnen. Bei der Erkennung muß entschieden werden, ob ein periodischer Anteil vorhanden ist und bei welcher Wellenlänge dieser liegt. Ist ein derartiger Anteil erkannt worden, können mit Hilfe des Maximum-Likelihood-Verfahrens /5/ die übrigen Parameter der Sinuswelle bestimmt werden.

Nachdem die Formkomponente mit einem Formfilter eliminiert worden ist und nur noch Welligkeit und Rauheit im verbleibenden Differenzprofil enthalten sind, ist die Erkennung periodischer Komponenten in einem Leistungsdichtespektrum möglich, das mit einer diskreten Fouriertransformation berechnet werden kann. Periodische Anteile treten dabei im Spektrum deutlich hervor (Bild 7). Um eine sichere Erken-

nung durchführen zu können, muß eine geeignete Leistungsschwelle gefunden werden, die angibt, welche Anteile des Leistungsdichtespektrum Teil der periodischen Komponente ist und welche Anteile dem Rauschanteil zuzuordnen sind (Bild 7).

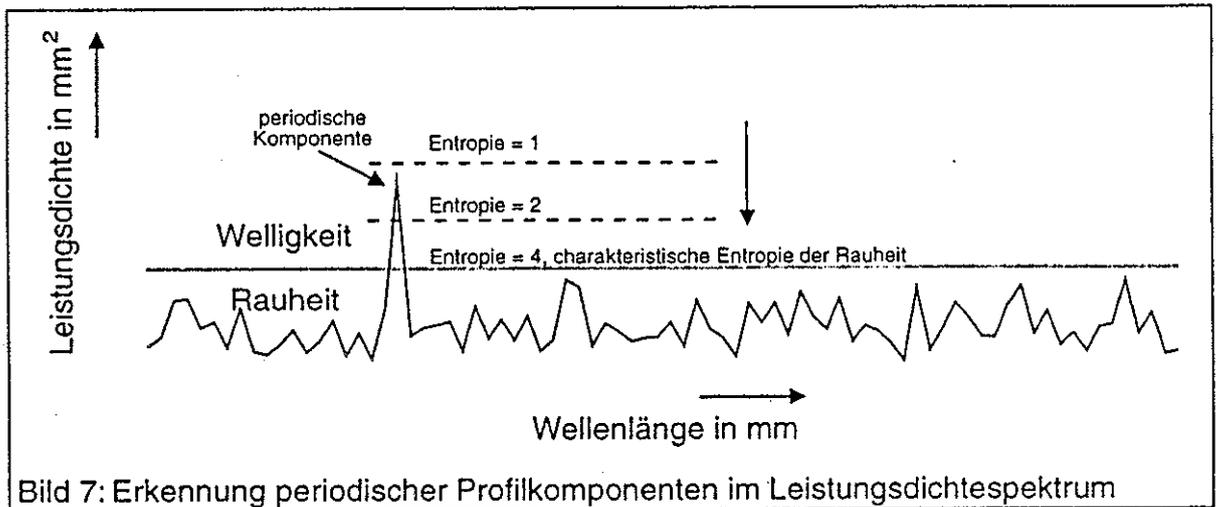


Bild 7: Erkennung periodischer Profilkomponenten im Leistungsdichtespektrum

Diese Schwelle kann durch Berechnung der Entropie des Rauschanteils im Leistungsdichtespektrum ermittelt werden. Die Entropie ist dabei ein Maß für die Unordnung des vorliegenden Signals. Für jeden bekannten Rauschprozeß läßt sich eine charakteristische Entropie angeben [6]. Da die Rauheit mit einer gaußschen Rauschverteilung nachgebildet werden kann und ihre Darstellung im Leistungsdichtespektrum einem rayleighverteiltem Rauschprozeß entspricht [7], ist auch ihr ein bestimmter Entropiewert zuzuordnen. Sind nun dem Rauschprozeß zusätzlich periodische Anteile überlagert, so nimmt die Entropie stark ab, da sich das Signal nunmehr in einem Zustand der höheren Ordnung befindet. Dieses Verhalten erweist sich für die Erkennung periodischer Profilanteile als günstig. Zu diesem Zweck wird eine willkürlich angenommene Schwelle so lange variiert, bis die unter dieser Schwelle liegenden Anteile des Leistungsdichtespektrums die charakteristische Rauschentropie annehmen (Bild 7). Alle über dieser Schwelle liegenden Anteile können folglich als periodisch angesehen werden.

Ein entscheidender Vorteil dieser Methode ist, daß die Bestimmung des Schwellwertes unabhängig von dem Signal/Rauschverhältnis (Leistungsverhältnis zwischen der Welligkeitskomponente und der Rauheitskomponente) des Differenzprofils ist. Somit läßt sich ein robustes Verfahren zur Erkennung periodischer Profilkomponenten realisieren.

## 7 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Formfiltertechnik vorgestellt, die eine fehlerfreie Approximation der Formkomponente technischer Oberflächen ermöglicht und somit eine verzerrungsfreie Berechnung des Welligkeitsprofils zuläßt. Es wurde gezeigt, daß sich die in DIN 4777 genormten Profilfilter durch eine geeignete Umrechnung in

ein Formfilter überführen lassen. Durch Anwendung eines speziellen Verfahrens können die Filtervor- und nachlaufstrecken vollständig kompensiert werden. Mit dieser Technik wird somit eine schnelle und robuste Filterung erreicht, die leicht in die vorhandene Software von Oberflächenmeßgeräten implementiert werden kann. An einem realen Profilbeispiel wurde anschließend die Leistungsfähigkeit der Formfiltertechnik verdeutlicht. Für eine differenzierte Welligkeitsauswertung zur Bestimmung von Amplitude, Wellenlänge und Phase periodischer Profilkomponenten, wurde ein Verfahren beschrieben, mit dem die Erkennung und Berechnung derartiger Profilanteile möglich wird. Eine Erkennung periodischer Profilkomponenten ist dabei unabhängig von dem Signal/Rauschverhältnis des Oberflächenprofils.

Anmerkung: Die in diesem Beitrag präsentierten Forschungsergebnisse stammen aus einem Projekt, das mit Mitteln der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) gefördert wird.

## **8 Literatur**

- /1/ Bodschwinn, H.: Oberflächenwelligkeit - Stand der Entwicklung, DIN-Mitteilungen, 60 Nr. 11, S. 687-691, 1981
- /2/ Trumpold, H.; Dietzsch, M.; Hoffmann, S.: Die Trennung von Rauheit, Welligkeit und Formabweichungen bei der Definition, Tolerierung und Messung von Gestaltabweichungen, TU Chemnitz-Zwickau, Interner Bericht, 9/1994
- /3/ Williamson, J.B.P.; Pullen, J.; Hunt, R.T.: The shape of Solid surfaces, Surface Mechanics, ASME, 1969
- /4/ Staufert, G.: Description of Roughness Profile by Separating the Random and Periodic Components, Wear 57, S. 185-194, 1979
- /5/ Kay, S.; Nagesha, V.: Maximum Likelihood Estimation of Signals in Autoregressive Noise, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 42, No. 1, 1994
- /6/ Coifman, R.R.; Wickerhauser, M.V.: Entropy-Based Algorithms for Best Basis Selection, IEEE Trans. on Information Theory 38-2, S.713-718, 1992
- /7/ Minkoff, J.: Signals, Noise and Active Sensors, J. Wiley and Sons, 1992

DIN 4777 Oberflächenmeßtechnik; Profilfilter zur Anwendung in elektrischen Tastschnittgeräten; Phasenkorrekte Filter, Beuth Verlag, Berlin 1990