

## AUSWERTUNG GEMESSENER OBERFLÄCHENPROFILE

Dr.-Ing. M. Hernla  
Dortmund

Das Ziel aller geometrischen Messungen ist die Ermittlung der wahren Oberflächen-gestalt. Dabei muß unterschieden werden, ob die festgestellten Abweichungen tat-sächlich in der Oberfläche enthalten sind oder aus der Messung stammen. Die Abweichungen der Oberfläche sind in geeigneter Weise als Meßergebnis anzuge-ben. Die Meßabweichungen werden als zufällige und systematische Anteile der Meßunsicherheit abgeschätzt und zusammengefaßt.

Zur Trennung der Abweichungen der Oberfläche von den Meßabweichungen werden heute z.B. bei Form- und Rauheitsmessungen die Meßwerte gefiltert. Die Grenz-wellenlängen und Übertragungscharakteristiken der Filter werden für die jeweilige Anwendung z.B. in Normen vereinbart. Niemand kann jedoch entscheiden, ob das eine oder das andere Filter und damit das eine oder das andere Meßergebnis objektiv besser ist.

Das Bild 1 gibt drei Darstellungen derselben Oberfläche wieder, die sich durch die Punktzahl unterscheiden: 5, 50 und 500 Punkte. Für die Bestimmung der Lage der Oberfläche (als eine mögliche Meßgröße) kann die Berechnung der angrenzenden Geraden an die fünf Punkte im oberen Bild unter Umständen schon ausreichend sein. Je nach Definition ist auch die Auswertung der mittleren Geraden durch die fünf Punkte möglich. Besonders problematisch ist der Vergleich von Meßergebnissen an Oberflächen, die mit verschiedenen Geräten gemessen wurden, z.B. mit Formprüf-geräten und Koordinatenmeßgeräten.

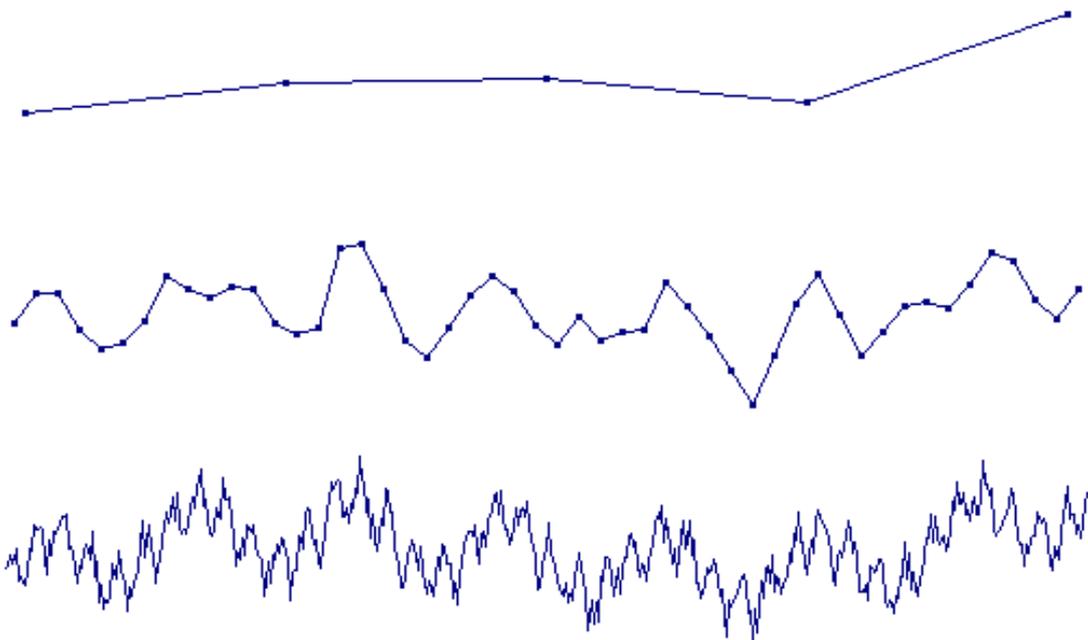


Bild 1: Erfassung eines Oberflächenprofils mit verschiedenen Meßpunktzahlen

Allein anhand der Darstellungen im Bild 1 kann nicht beurteilt werden, ob die fünf Punkte zur Lösung der Meßaufgabe ausreichen, oder ob eventuell mehr gemessen werden müssen. Eine solche Entscheidung ist dann möglich, wenn die Meßunsicherheit der einzelnen Prüfmerkmale bekannt ist und mit der Toleranz verglichen wird. Die Meßunsicherheit darf dabei nach der Goldenen Regel ein Fünftel bis ein Zehntel der Toleranz nicht überschreiten.

## **Meßunsicherheit**

Beim heutigen Stand der Oberflächenmeßtechnik ist es nicht allgemein üblich, zum Meßergebnis die Meßunsicherheit mit anzugeben. Der Grund liegt vor allem in den verfügbaren technischen Möglichkeiten, da die Grundlagen im wesentlichen beschrieben sind. Dazu soll zunächst ein kurzer Überblick gegeben werden.

Ein möglicher Weg zur Bestimmung der Meßunsicherheit ist die Wiederholung der Messung unter Wiederhol- bzw. Vergleichbedingungen. Für die einzelnen Prüfmerkmale werden dann Mittelwert, Standardabweichung und Vertrauensbereich für das Vertrauensniveau 95% als Maß für die Unsicherheit berechnet [1] [2] [3]. Dieses Vorgehen hat zwei wesentliche Nachteile:

- Der Aufwand für die Meßreihen ist sehr hoch (Zeit für Einzelmessungen und Kosten für das Meßgerät). Es sind dabei jedesmal andere Punkte anzutasten, um den Einfluß der örtlichen Formabweichungen mit zu erfassen. Bei Koordinatenmeßgeräten müssen deshalb z.B. die Antastpositionen jedesmal neu im Steuerprogramm vorgegeben werden, was mit den meisten Geräten nicht ohne weiteres möglich ist.
- Die Ergebnisse gelten nur für Oberflächen mit vergleichbarer Gestalt und sind nicht auf Oberflächen mit anderen Typen oder Werten der Formabweichung übertragbar, schon gar nicht auf unbekannte Oberflächen.

Eine zweite Möglichkeit zur Bestimmung der Meßunsicherheit ist ihre Abschätzung aus einer einzelnen Messung. Voraussetzung dabei ist, daß das Prüfmerkmal als Mittelwert aus einer Stichprobe mit einer gewissen Anzahl von Punkten berechnet wurde, die größer als die mathematisch notwendige Mindestpunktzahl ist.

Bei der Berechnung von idealgeometrischen Ersatzelementen mittels Ausgleichsrechnung ist diese Voraussetzung zumeist gegeben. Die Formelementeparameter ergeben sich dann als Lösungen eines linearen Gleichungssystems. Die Grundlagen zur Berechnung der Unsicherheiten sind in [3] allgemein dargestellt. Der Punkt 5.2 (Gauß-Verfahren) behandelt die Berechnung der Kovarianzmatrizen, die die Streuung der Formelementeparameter beschreiben.

Unter der Voraussetzung, daß die Abweichungen der Meßpunkte zum idealgeometrischen Ersatzelement unabhängig und normalverteilt sind, wird der Vertrauensbereich aus der Stichprobe mit der Annahme einer bestimmten Meßwertverteilung abgeschätzt. In den meisten Fällen ist die Annahme einer Normalverteilung richtig. Für die Stichprobe werden dann die Faktoren der  $t$ -Verteilung (Student-Verteilung) für die entsprechende Anzahl der Freiheitsgrade eingesetzt [4].

## Charakter der Oberflächenabweichungen

In der Standardabweichung der Meßpunkte zum idealgeometrischen Ersatzelement sind sowohl die Abweichungen der Oberfläche als auch die der Messung enthalten. Diese Abweichungen können völlig unterschiedlicher Art sein, wie das Bild 2 zeigt. Die Standardabweichung am Ausgleichskreis ist in beiden Fällen gleich. Links handelt es sich um systematische Abweichungen, und die Abweichungen der benachbarten Punkte vom Ausgleichskreis unterscheiden sich kaum voneinander. Bei Wiederholmessungen streuen die Ergebnisse nur wenig.

Im rechten Bild dagegen sind die Abweichungen unabhängig voneinander. Bei Wiederholmessungen ist die Streuung der Ergebnisse deutlich größer als im linken Bild. Die auf diese Weise ermittelten Meßunsicherheiten stehen im selben Verhältnis. Dagegen sind die mit der Standardabweichung aus einer Messung berechneten Unsicherheiten gleich groß. Hier wird für das linke Bild die Unsicherheit zu groß abgeschätzt.

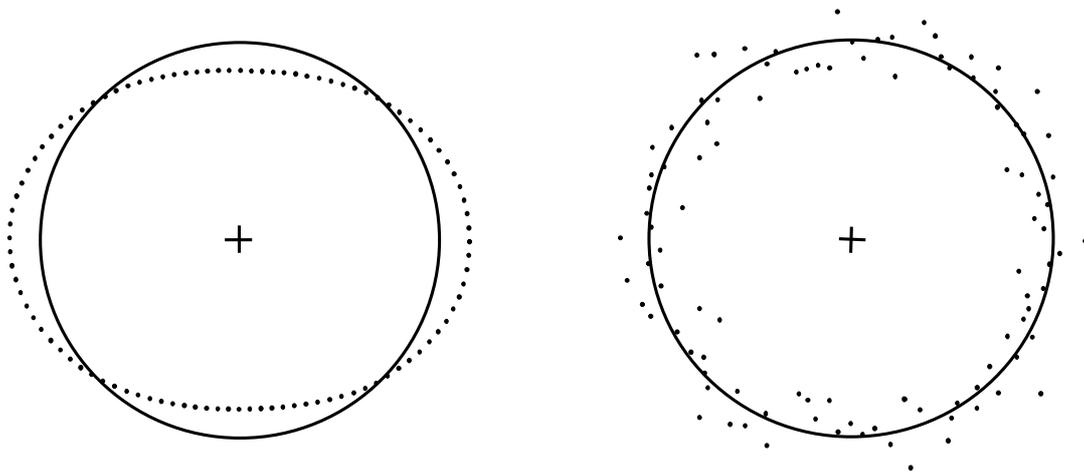


Bild 2: Kreisprofil mit überlagerten systematischen Abweichungen (links) und mit zufälligen Abweichungen (rechts)

Bei der Messung von beliebigen Werkstücken sind die Meßwerte immer eine Summe aus überlagerten zufälligen und systematischen Anteilen. Wie groß die jeweiligen Anteile sind, wird auch durch die Meßpunktzahl bestimmt.

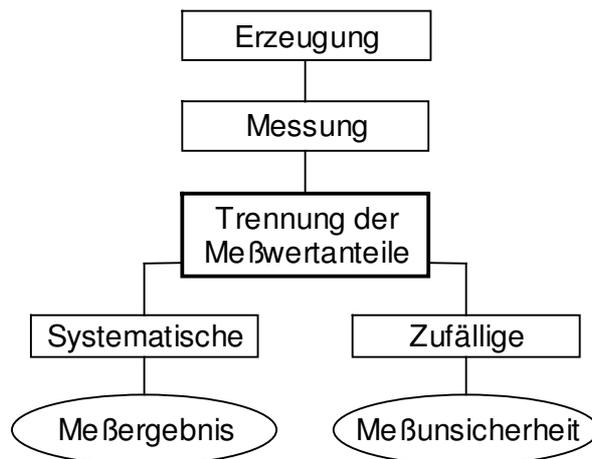
Im linken Bild beschreiben die angetasteten Meßpunkte recht gut den Verlauf der Oberfläche. Würde dieselbe Oberfläche mit ganz wenigen Punkten angetastet, so kann ein Bild entstehen, das (wie das rechte Bild) keine systematischen Abweichungen erkennen läßt. Umgekehrt ist es denkbar, daß bei einer Messung mit einer deutlich höheren Punktzahl auch im rechten Bild systematische Abweichungen sichtbar werden.

Eine größere Meßpunktzahl liefert also prinzipiell ein besseres Bild der Oberfläche und erhöht die Chance zum Erkennen systematischer Anteile. Eine sehr kleine Punktzahl kann wiederum dazu führen, daß vorhandene systematische Abweichungen nicht erkannt werden. Dasselbe passiert (unabhängig von der Meßpunktzahl), wenn die systematischen Abweichungen des Werkstückes sehr klein sind und in der Größenordnung der Meßabweichungen des Meßgerätes liegen.

## Auswertemodell

Eine Ansatz zur Lösung des Problems liefert die folgende Überlegung: Bei realen Werkstücken entsteht die Oberfläche durch Überlagerung von zufälligen und systematischen Einflüssen in der Fertigung. Bei der Messung wird die wahre Oberfläche durch die systematischen und die zufälligen Meßabweichungen überlagert. Das Ergebnis ist immer eine Summe aus je zwei systematischen und zufälligen Anteilen, siehe Bild 3. Der erste Schritt ist deshalb die Trennung der systematischen und zufälligen Meßwertanteile.

Bild 3:  
Auswertemodell



Zur Trennung der Meßwertanteile nimmt man objektive Kriterien zu Hilfe, z.B. den aus der mathematischen Statistik bekannten Korrelationskoeffizienten für benachbarte Meßpunktabweichungen. Er kann für jedes beliebige Oberflächenprofil berechnet werden. Im Vergleich mit seinem Zufallshöchstwert für ein vorgegebenes Vertrauensniveau liefert er eine Aussage darüber, ob die Abweichungen voneinander unabhängig sind oder nicht. Sind sie nicht unabhängig, so enthalten die Meßwerte noch systematische Anteile. Das idealgeometrische Ersatzelement stellt in diesem Fall nur eine erste, grobe Näherung für die Oberfläche dar. Es gilt, eine mathematische Beschreibung der Oberfläche zu finden, die ihren Verlauf möglichst gut erfaßt.

Es kann grundsätzlich mit beliebigen Funktionsansätzen gearbeitet werden. Die gewählte Funktion wird nach der Gaußschen Minimumbedingung für die Summe der kleinsten Abstandsquadrate als mittleres Profil in die angetasteten Oberflächenpunkte eingepaßt. Ob die Funktion zur Beschreibung der Oberfläche geeignet ist, kann anhand des Korrelationskoeffizienten beurteilt werden. Das Ergebnis ist eine Funktion, die den systematischen Anteil der Oberflächenabweichungen beschreibt. Sie stellt das eigentliche Meßergebnis dar und kann für beliebige weitere Berechnungen verwendet werden, z.B. zum Filtern oder zur Korrektur eventuell bekannter systematischer Abweichungen des Meßgerätes.

Die Restabweichungen der Antastpunkte zum mittleren Profil sind voneinander unabhängig. Sie repräsentieren den zufälligen Meßwertanteil, und ihre Standardabweichung geht über die Kovarianzmatrizen in die Meßunsicherheit der Parameter ein.

## Beispiel Kreismessung

Die folgenden Bilder geben ein Beispiel für das Vorgehen. Im Bild 4 ist ein aus hundert Punkten berechneter Ausgleichskreis dargestellt. Die Vertrauensbereiche des Mittelpunktes und der Kreislinie sind für die Standardabweichung am Ausgleichskreis berechnet. Die Lage der Meßpunkte läßt einen deutlich anderen Verlauf der Oberfläche vermuten, als durch den Ausgleichskreis beschrieben wird.

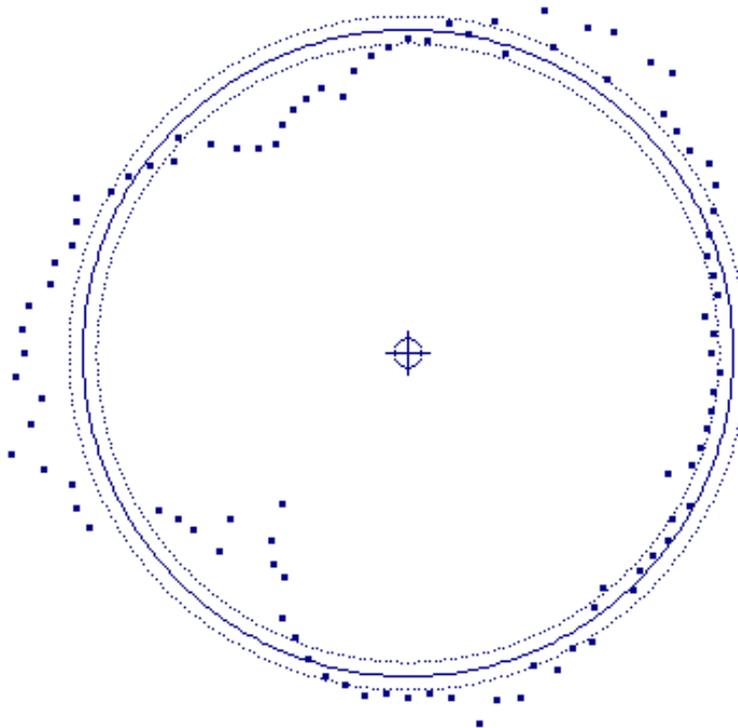


Bild 4: Kreismessung mit 100 Punkten; Meßpunkte mit Ausgleichskreis und Vertrauensbereichen

Eine harmonische Analyse (Fourieranalyse) liefert das im Bild 5 links dargestellte Amplitudenspektrum. Die dritte Harmonische dominiert. Sie wird mit dem Korrelationskoeffizienten als systematischer Anteil erkannt und aus den Meßwerten eliminiert. Für die Restabweichungen wird ein neuer Korrelationskoeffizienten berechnet. So werden in diesem Beispiel schrittweise die 2. bis 7. Harmonische als systematische Meßwertanteile erkannt.

Die nach deren Eliminierung verbleibenden Harmonischen beschreiben den zufälligen Anteil der Meßwerte. Ihre Amplituden haben die im Bild 5 rechts dargestellte typische Verteilung, und für sie lassen sich ebenfalls Zufallshöchstwerte angeben. Im Bild sind sie für die Vertrauensniveaus 95% und 99% eingezeichnet ( $C_{zmax}$ ...). Die eine dazwischenliegende Harmonische entspricht dem zu erwartenden Anteil. Die Zufallshöchstwerte der Harmonischen stellen neben dem Korrelationskoeffizienten ein weiteres Kriterium zur Trennung der systematischen von den zufälligen Meßwertanteilen dar.

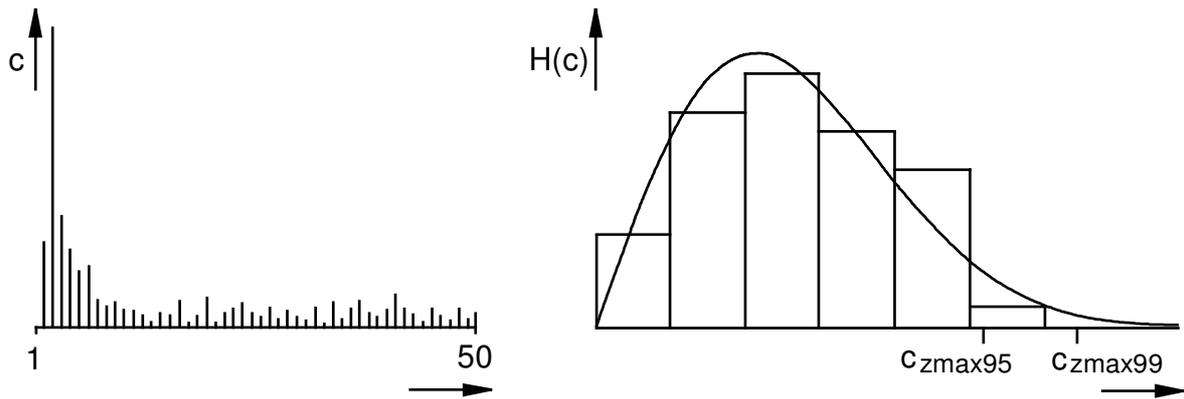


Bild 5: Kreismessung; links Amplitudenspektrum der Harmonischen für die Ausgangswerte, rechts Häufigkeitsverteilung der Amplituden für die verbleibenden Harmonischen aus den zufälligen Meßwertanteilen

Die als systematische Meßwertanteile erkannten Harmonischen beschreiben in ihrer Summe den mittleren Verlauf der Oberfläche, siehe Bild 6. Die Vertrauensbereiche des berechneten mittleren Profils und des Mittelpunktes sind deutlich schmaler als im Bild 4, da die Standardabweichung der zufälligen Restabweichungen kleiner als die am Ausgleichskreis ist.

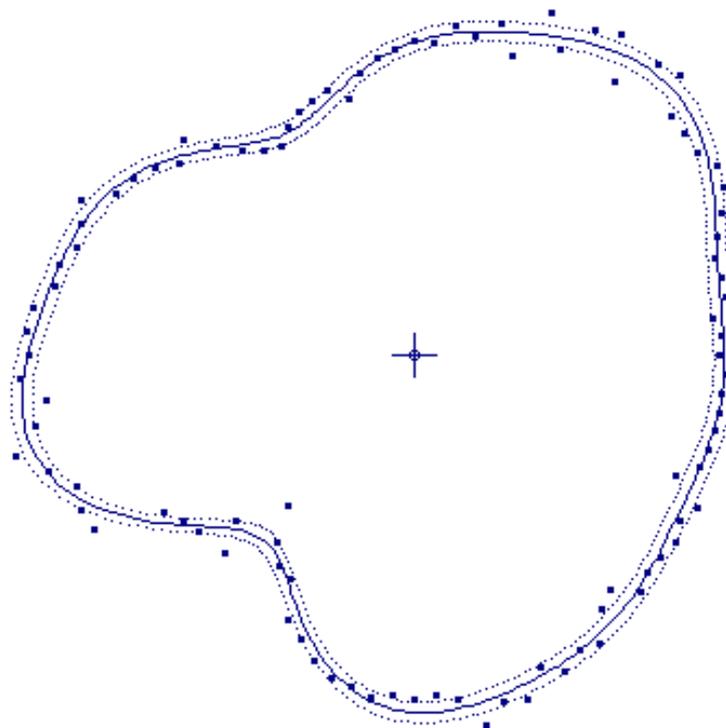


Bild 6: Kreismessung; Meßwerte mit mittlerem Profil und Vertrauensbereichen

## Beispiel Geradenmessung

Dasselbe Vorgehen kann auch auf die Meßwerte aus Bild 1 angewandt werden, siehe Bild 7. Bei den fünf Antastpunkten ist die Ausgleichsgerade die bestmögliche Beschreibung der Oberfläche. Bei den anderen Darstellungen folgt das mittlere Profil gut dem Verlauf der Meßwerte und beschreibt bei der größten Punktzahl auch deutlich mehr Einzelheiten. Zusätzlich sind die Vertrauensbereiche eingezeichnet. Ein Vergleich der Vertrauensbereiche in der Mitte der Profile (Darstellungen am rechten Rand) zeigt, daß sie mit größerer Meßpunktzahl immer kleiner werden. Die Messungen werden also genauer.

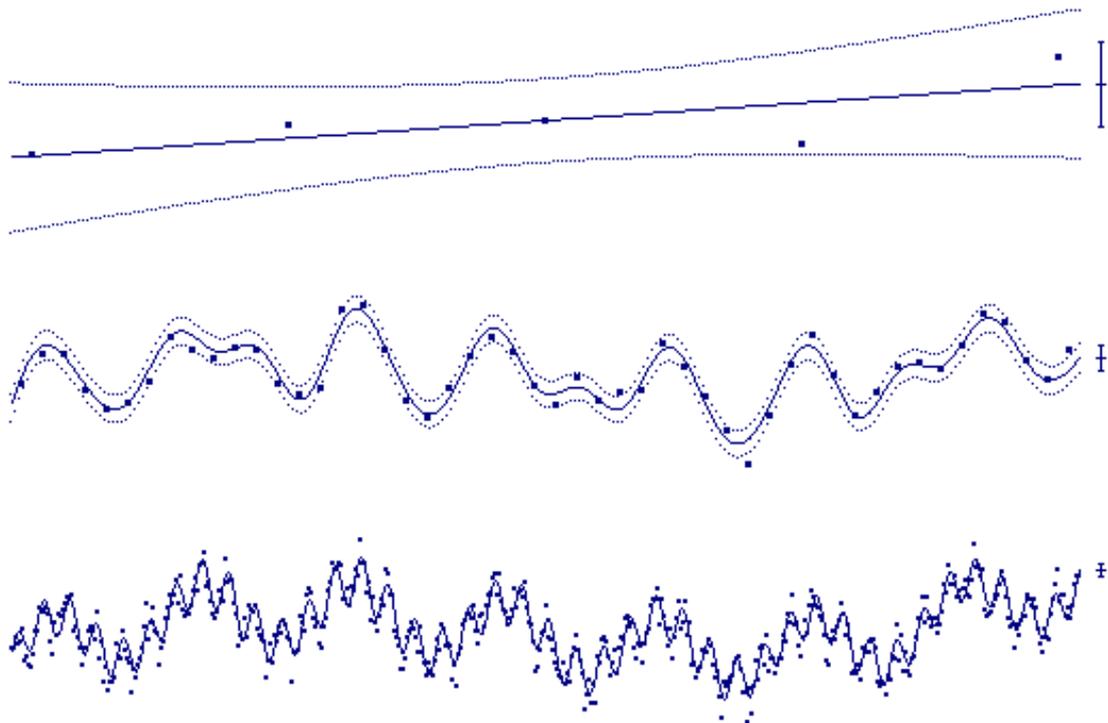


Bild 7: Meßpunkte aus Bild 1 mit mittleren Profilen und Vertrauensbereichen

## Angrenzende Formelemente

Die Notwendigkeit der Berechnung des mittleren Profils ergibt sich oft auch aus der Aufgabenstellung. Hat eine Oberfläche keine Hüllfunktion, so ist das idealgeometrische Ersatzelement als Meßergebnis ausreichend, z.B. der Ausgleichskreis aus Bild 4. Die Trennung der Meßwertanteile ist dann nur insoweit interessant, als sie eine kleinere Standardabweichung für die zufälligen Meßwertanteile liefert. Als Meßergebnis wird dann der Ausgleichskreis wie in Bild 4 mit deutlich kleineren Vertrauensbereichen angegeben.

Hat die Oberfläche dagegen eine Hüllfunktion, so ist das von der materialfreien Seite angrenzende idealgeometrische Ersatzelement zu berechnen, z.B. der Hüll- oder der Pferchkreis [4] [6]. Auch für diesen Fall können die Vertrauensgrenzen der Parameter angegeben und mit den Toleranzen verglichen werden. Das Bild 8 zeigt ein Beispiel.

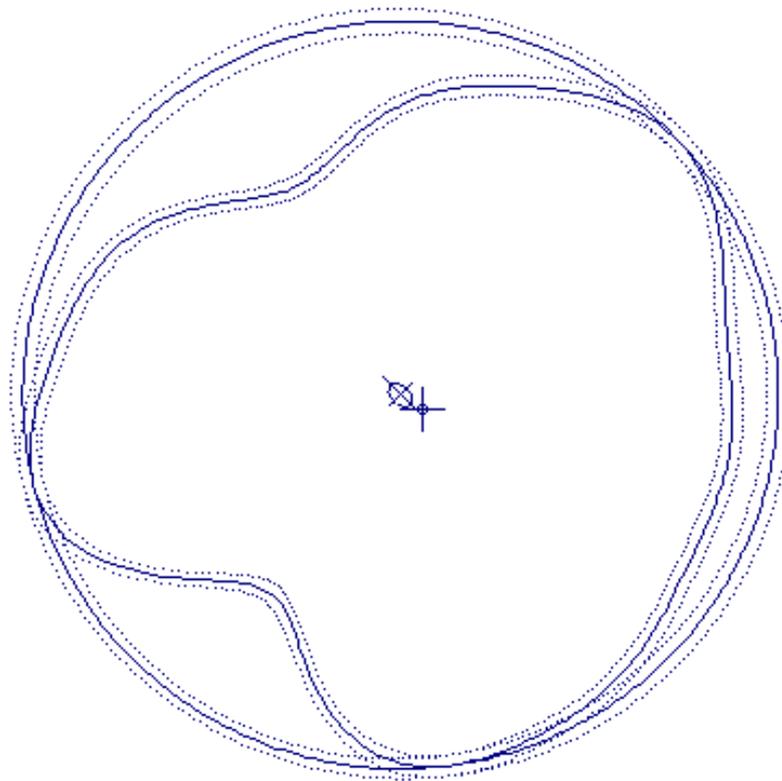


Bild 8: Kreismessung; Angrenzender Kreis (Hüllkreis) an das mittlere Profil aus Bild 6, mit Vertrauensbereichen

### **Formabweichungen**

Mit dem beschriebenen Vorgehen können nun ohne weiteres die Formabweichungen für beliebige idealgeometrische Ersatzelemente zum mittleren Oberflächenprofil berechnet werden. Da für beide die Vertrauensbereiche bekannt sind, lassen sich auch für die Formabweichungen Meßunsicherheiten angeben und auf die Einhaltung der zulässigen Meßunsicherheit prüfen [4] [6]. Auf diese Weise werden die Ergebnisse von Formprüfgeräten und Koordinatenmeßgeräten vergleichbar.

### **Auswertung von Rauheitsmessungen**

Die Vielseitigkeit des eingesetzten Verfahrens zeigt sich auch bei der Auswertung von Rauheitsmessungen. Eine Anwendung mit der Trennung der systematischen und zufälligen Meßwertanteile wurde schon in [7] beschrieben. Mit den Kovarianzmatrizen der berechneten Funktionen lassen sich für die Rauheitsparameter Meßunsicherheiten angeben. Damit werden die Ergebnisse von Rauheitsmessungen mit verschiedenen Geräten ebenfalls vergleichbar.

Das Bild 9 stellt oben ein Rauheitsprofil dar, wie es nach dem Filtern der Meßwerte aus Bild 1 entstanden sein könnte. Für jede der fünf Einzelmeßstrecken sind die Einzelrauhigkeiten nach DIN 4768 [8] eingezeichnet. Im unteren Bild wird die gleiche Auswertung am mittleren Profil vorgenommen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 gegenübergestellt. Im zweiten Fall sind  $R_i$ ,  $R_z$  und  $R_{max}$  natürlich kleiner, da sie keine zufälligen Meßwertanteile enthalten. Der wesentliche Unterschied zur konventionellen Auswertung ist jedoch, daß hier zu den Ergebnissen auch die Unsicherheiten angegeben werden können. Der Unterschied bei  $R_a$  ist dagegen schon fast vernachlässigbar klein.

Eine Vorlaufstrecke ist zum Filtern nicht erforderlich. Es können alle denkbaren Filter mit beliebigen Filtercharakteristiken nachgebildet werden.

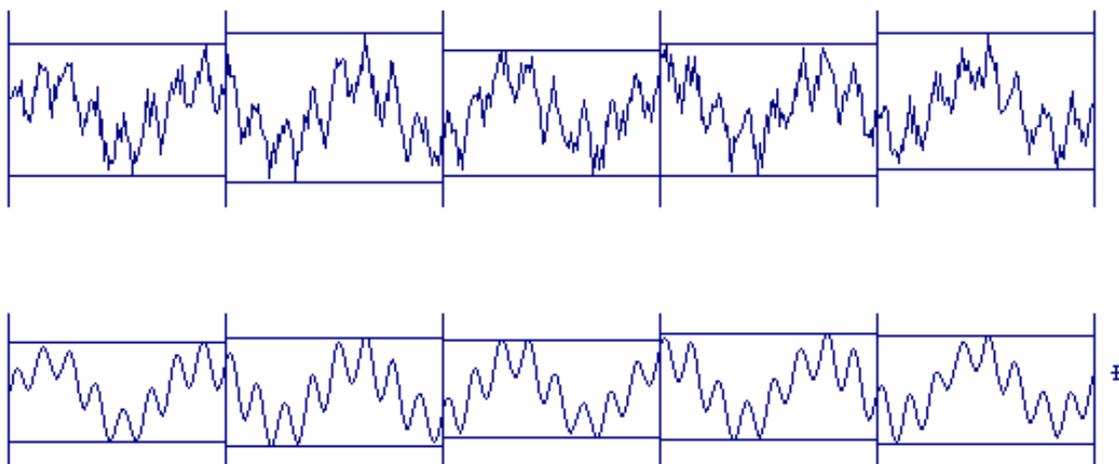


Bild 9: Rauheitsprofil; Ermittlung von  $R_i$ ,  $R_z$  und  $R_{max}$  aus den Meßwerten nach DIN 4768 (oben) und am mittleren Profil (unten)

Tabelle 1: Auswertung des Rauheitsprofils aus Bild 9 mit  $R_a$ ,  $R_i$ ,  $R_z$  und  $R_{max}$  aus den Meßwerten nach DIN 4768 und am mittleren Profil

Meßgröße	DIN 4768	Auswertung am mittleren Profil	
	Ergebnis	Ergebnis	Unsicherheit
	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
$R_1$	6,1	4,6	0,37
$R_2 = R_{max}$	6,9	5,0	
$R_3$	5,8	4,5	
$R_4$	6,1	4,9	
$R_5$	6,2	4,9	
$R_z$	6,2	4,8	0,17
$R_a$	1,14	1,06	0,05

## Zusammenfassung

Der Grundgedanke des vorgestellten Modells zur Auswertung von Oberflächenprofilen ist die Trennung der zufälligen und systematischen Meßwertanteile. Die systematischen Anteile beschreiben in einer mehr oder weniger guten Näherung den mittleren Verlauf der Oberfläche. Die zufälligen Anteile sind voneinander unabhängig und normalverteilt. Ihre Standardabweichung wird zur Berechnung der Kovarianzmatrizen der Ergebnisparameter und zur Abschätzung der Meßunsicherheit benutzt.

Bei praktischen Messungen besteht das Problem in der Wahl eines geeigneten mathematischen Modells zur Beschreibung der Oberfläche. Die in der Gestaltmeßtechnik häufig verwendeten idealgeometrische Ausgleichselemente stellen oft nur eine grobe Näherung dar. Stehen genügend Meßpunkte zur Verfügung, können Funktionen berechnet werden, die den mittleren Oberflächenverlauf deutlich besser wiedergeben. In der Praxis haben sich hier Summen von trigonometrischen Funktionen bewährt. Die Datenmenge wird deutlich reduziert. An Stelle vieler Einzelpunkte können die Parameter der berechneten Funktionen weiterverarbeitet werden.

Das Verfahren ist bei allen Oberflächenmessungen anwendbar. Es gestattet auch die Berechnung von funktionsgerechten angrenzenden idealgeometrischen Ersatzelementen und die Berechnung von Formabweichungen für die verschiedenen Ersatzelemente. Bei genügend großer Punktdichte auf der Oberfläche können auch Rauheitsmessungen ausgewertet werden. Für alle Ergebnisse werden Meßunsicherheiten in Form von Vertrauensbereichen angegeben. Mit geeigneten Funktionsansätzen lassen sich nicht nur Oberflächenprofile, sondern auch räumliche Flächen beschreiben.

## Literatur

- [1] Internationales Wörterbuch der Metrologie. Beuth Verlag, Berlin Wien Zürich 1994
- [2] Kessel, W.: Meßunsicherheit und Meßwert nach der neuen ISO/BIPM-Richtlinie. *tm Technisches Messen* 62 (1995) 7/8, Seite 306-312
- [3] DIN 1319 Teil 4 (1985): Grundbegriffe der Meßtechnik; Behandlung von Unsicherheiten bei der Auswertung von Messungen
- [4] Hernla, M.: Abschätzung der Meßunsicherheit bei Koordinatenmessungen unter den Bedingungen der industriellen Fertigung. *VDI-Fortschrittberichte Reihe 2*, Nr. 274, Düsseldorf 1992
- [5] Rogazewski, P.: Ein Modell zur Auswertung von Meßwertfolgen im Hinblick auf gemessene Oberflächenprofile. *Metrologische Abhandlungen*, Berlin 8 (1988) 4, S. 291-295
- [6] Hernla, M.: Die Unsicherheit von angrenzenden Formelementen. *Qualität und Zuverlässigkeit*, München 38 (1993) 6, S. 373-378
- [7] Bodschninna, H.; Bohlmann, H.: Erweiterte Methode der Signalanalyse für den Einsatz in der prozeßnahen Rauheitsmessung. *VIII. Internationales Oberflächenkolloquium Chemnitz 1992*, Band 1, S. 171-179
- [8] DIN 4768 (1990): Ermittlung der Rauheitskenngrößen  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  mit elektrischen Tastschnittgeräten; Begriffe, Meßbedingungen