

Mathematische Modellierung geometrischer Messverfahren

Dr.-Ing. **Michael Hernla**, Dortmund

Kurzfassung

Die geometrische Messtechnik dient der Erfassung der tatsächlichen Oberflächengestalt. Diese wird aber durch die begrenzte Anzahl der Messpunkte und die begrenzte Genauigkeit der Messeinrichtung nur mehr oder weniger gut erfasst. Die Angabe der Messunsicherheit muss beide Einflüsse berücksichtigen. Die erfasste Oberfläche wird dabei durch geeignete Funktionen als systematische Messwertanteile beschrieben, und die Unsicherheit wird aus den verbleibenden zufälligen Messwertanteilen ermittelt. Beide Anteile lassen sich nach objektiven Kriterien voneinander trennen. Die systematischen Messwertanteile werden zur Korrektur der Abweichungen von Messeinrichtungen und Geometrienormalen verwendet, die zufälligen liefern die Messunsicherheit.

1. Einleitung

Bei der Messung geometrischer Größen werden Eigenschaften wie Maß, Form und Lage sowie Welligkeit und Rauheit bestimmt. Diese Merkmale sind mit ihren Toleranzen und Abweichungen im Normensystem für Geometrische Produktspezifikationen und -prüfung (GPS) definiert. Die wesentlichen Normen sind ISO 8015 (Grundlagen) [1], ISO 14660-1 (Grundbegriffe) [2], ISO 14405-1 (Längenmaße) [3], ISO 1101 (Form und Lage) [4] und ISO 5459 (Bezüge) [5].

Auf dieser Grundlage werden Toleranzen in Zeichnungen eingetragen und die entsprechenden Abweichungen ermittelt. Die ISO 14660-1 unterscheidet die theoretischen, geometrisch idealen *Nenn-Elemente* und die hergestellten, *wirklichen Elemente*, siehe Bild 1. Diese sind unbekannt und müssen durch Messungen bestimmt werden. Bei der Messung werden zunächst die Oberflächen erfasst und dazu abgeleitete Elemente bestimmt. In vielen Fällen werden aber nicht die *erfassten Elemente*, sondern wieder geometrisch ideale *zugeordnete Elemente* ausgewertet (Bild 1), um die Funktionsanforderungen besser zu beschreiben.

Bei den heute üblichen rechnergestützten Messgeräten werden die Oberflächen aber nicht kontinuierlich, sondern mit mehr oder weniger vielen Einzelpunkten erfasst. So ist nicht unbedingt sichergestellt, dass tatsächlich die für die Funktion ausschlaggebenden höchsten bzw. tiefsten Punkte der Oberflächen ausgewertet werden. Die Annäherung des punktwisen Abbildes an die wirkliche Oberfläche wird vorausgesetzt, ohne das ausdrücklich zu prüfen.

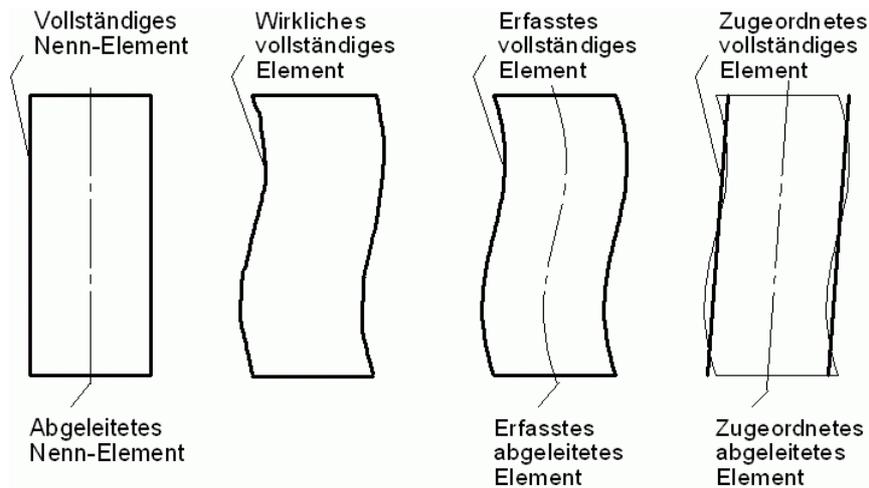


Bild 1: Begriffe zu geometrischen Elementen nach ISO 14460-1

Üblicherweise wird das Problem schon durch die grafische Darstellung der Abweichungen verdeckt, indem zwischen den erfassten Messpunkten gerade Linien durchgezogen werden. Damit entsteht der Eindruck, als wäre die Oberfläche vollständig erfasst, obwohl es tatsächlich nur einzelne Punkte sind (Bild 2).

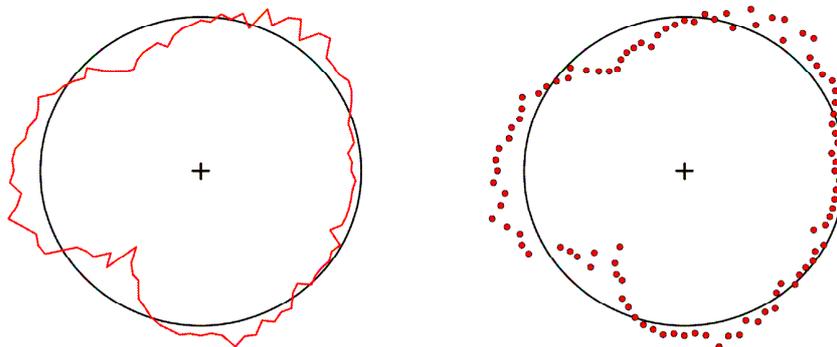


Bild 2: Abweichungen vom Ausgleichskreis mit (links) und ohne Verbindungslinien (rechts)

Ein weiteres Problem ist die Aussagekraft der Messergebnisse. Bei einem Einstellring werden z.B. im Kalibrierschein der Durchmesser und die Rundheitsabweichung in einer Ebene in der Mitte des Ringes angegeben. Der Durchmesser ist dabei das Zweipunktmaß zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten der Oberfläche, die markiert sind. Der Istwert kann zur Korrektur von Messergebnissen verwendet werden.

Die Rundheitsabweichung ist nach ISO 1101 Anhang B [4] die Radiendifferenz von zwei konzentrischen Kreisen, die das Geometrielement einschließen, und die den kleinstmöglichen Wert annimmt. Diese beiden Kreise liegen an insgesamt vier erfassten Punkten der Oberfläche an. Wie die Oberfläche dazwischen aussieht, spielt keine Rolle. Hier können die

Abweichungen also nicht zur Korrektur von Messergebnissen verwendet werden. Das gilt auch für alle anderen Form- und Lagetoleranzen nach ISO 1101.

Zusätzlich werden im Kalibrierschein weitere Messbedingungen wie Tastkugeldurchmesser und Grenzwellenzahl bzw. -wellenlänge des Filters angegeben. Die Tastkugel wirkt als morphologischer Filter und erzeugt eine von außen an die Oberfläche angelegte Hüllkurve (siehe ISO 16610-40 [6]). Das Filter soll dagegen die zufälligen Messabweichungen (Rauschen) aus den Messwerten eliminieren.

2. Filterung

Bei der Messung überlagern sich zufällige und systematische Abweichungen mit den zufälligen und systematischen Abweichungen, die durch die Herstellung auf die Oberfläche aufgeprägt sind. Beide Anteile lassen sich nicht ohne weiteres voneinander trennen.

Zur Abtrennung der zufälligen Messabweichungen aus den Messwerten wurden ursprünglich elektrische RC-Filter eingesetzt, d.h. eine Kombination aus Widerstand und Kondensator, um das Messsignal zu glätten. Diese wurden später durch Software-Filter ersetzt, von denen das bekannteste und meist verwendete das Gaußfilter nach ISO 16610-21 ist [7].

Die verschiedenen Filter unterscheiden sich nach ihren Gewichts- und Übertragungsfunktionen, wobei die wichtigste Kenngröße die Grenzwellenlänge bzw. Grenzwellenzahl ist, bei der ein bestimmter Anteil der Amplitude einer idealen Sinusfunktion durchgelassen oder abgeschnitten wird. Zur Auswahl des Filters sind z.B. in VDI/VDE 2631-3 [8] Diagramme angegeben. Die Eingangsgrößen (z.B. Tastkugeldurchmesser) müssen aber schon vor der Messung in Abhängigkeit von der Wellentiefe W_t festgelegt werden. Diese muss zuvor aus einer anderen Messung bestimmt werden und hängt wiederum von weiteren Messbedingungen ab, die ebenfalls zu definieren sind. Zusätzlich werden die Filter mit grob gestuften Grenzwellenlängen bzw. -zahlen eingesetzt, bei Rundheitsmessungen z.B. mit 15, 50, 150 oder 500 Wellen am Umfang (W/U). Auf die entscheidende Frage, ob die abgeschnittenen kurzwelligen Signalanteile tatsächlich zufällig oder vielleicht auch systematisch sind, wird nicht eingegangen.

3. Systematische und zufällige Abweichungen

Zur Unterscheidung der systematischen und zufälligen Messwertanteile sollen zunächst diese Begriffe geklärt werden. Im Bild 3 links unterscheiden sich die Abweichungen von benachbarten Messpunkten kaum voneinander. Die Beträge ändern sich nur in kleinen Schritten, und es gibt ausgedehnte Bereiche mit gleichen Vorzeichen. Im Bild 3 rechts bestehen die Abweichungen von benachbarten Messpunkten aus normalverteilten

Zufallszahlen: Beträge und Vorzeichen sind unabhängig voneinander. Sie ändern sich willkürlich innerhalb des gesamten Streubereiches, und es gibt keine größeren Bereiche mit gleichen Vorzeichen.

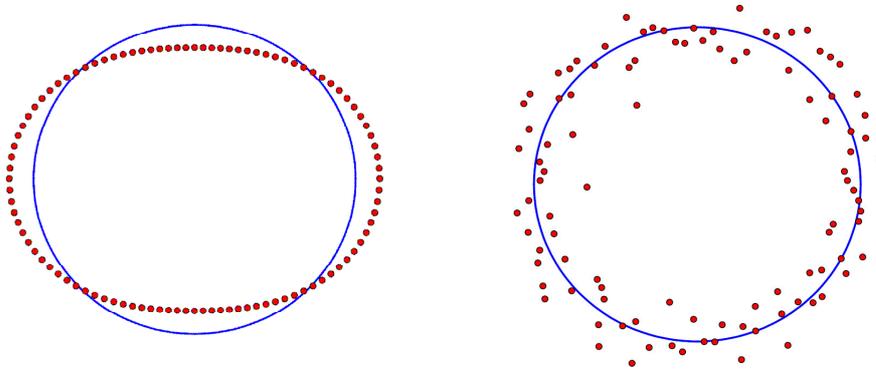


Bild 3: Systematische (links) und zufällige Abweichungen (rechts) an einem Kreis

Diese Eigenschaften lassen sich objektiv z.B. mit den Testwerten ξ_1 und ξ_2 aus DIN 1319-4, Abschnitt 8.2 [9], im Vergleich zu den kritischen Werten prüfen. Der Testwert ξ_1 wird aus den Abweichungen δr_i der Messwerte vom Kreis berechnet, und der Testwert ξ_2 aus den Vorzeichen (*sign*) dieser Abweichungen:

$$\xi_1 = \frac{1}{u^2} \sum_{i=1}^n \delta r_{i-1} \cdot \delta r_i \leq k \cdot \sqrt{n-p} \quad \text{mit } u^2 = \sum_{i=1}^n \delta r_i^2 \quad (1)$$

$$\xi_2 = \sum_{i=1}^n \text{sign}(\delta r_{i-1}) \cdot \text{sign}(\delta r_i) \leq k \cdot \sqrt{n} \quad \text{mit } \delta r_0 = \delta r_n \quad (2)$$

Dabei sind n die Anzahl der Messwerte und p die Anzahl der freien Parameter (Kreis $p=3$). Der Faktor k entspricht dem Erweiterungsfaktor, der abhängig von den $n-p$ Freiheitsgraden für den Grad des Vertrauens von $P=95\%$ mit dem Wert der t -Verteilung festgelegt wird.

Am realen Werkstück überlagern sich systematische und zufällige Anteile, wobei die Mischung von der Oberflächengestalt selbst, von der Anzahl und der zufälligen Lage der Messpunkte auf der Oberfläche sowie von der Genauigkeit der Messeinrichtung abhängt. Im Bild 2 sind deutlich je drei Abschnitte mit positiven und mit negativen Vorzeichen der Abweichungen zu erkennen. Die Testwerte ξ_1 (86,1) und ξ_2 (80) sind deutlich größer als ihre kritischen Werte (19,5 bzw. 19,8), d.h. die Abweichungen enthalten nicht nur zufällige, sondern auch wesentliche systematische Anteile.

Es hat allerdings wenig Sinn, Filter mit einer vorgegebenen Grenzwellenzahl zu verwenden. Im Gegenteil muss die Grenzwellenzahl gefunden werden, bei der gerade die zufälligen Messwertanteile abgetrennt werden. Praktisch beginnt man mit einer kleinen Grenzwellenzahl und testet die Restabweichungen vom tiefpassgefilterten mittleren Profil auf Zufälligkeit.

Dann wird die Grenzwellenzahl schrittweise erhöht, bis die Testwerte kleiner als die kritischen Werte sind. In der Regel erhält man eine gebrochene Grenzwellenzahl.

Im Bild 4 sind ein Gaußfilter mit der gebrochenen (links) und den genormten Grenzwellenzahlen gegenübergestellt. Letztere nähern sich mehr an die Messpunkte an, und die Streuung der Restabweichungen ist deutlich kleiner als im Bild 4 links. Die Testwerte sind stark negativ – es werden also auch zufällige Messwertanteile herausgefiltert.

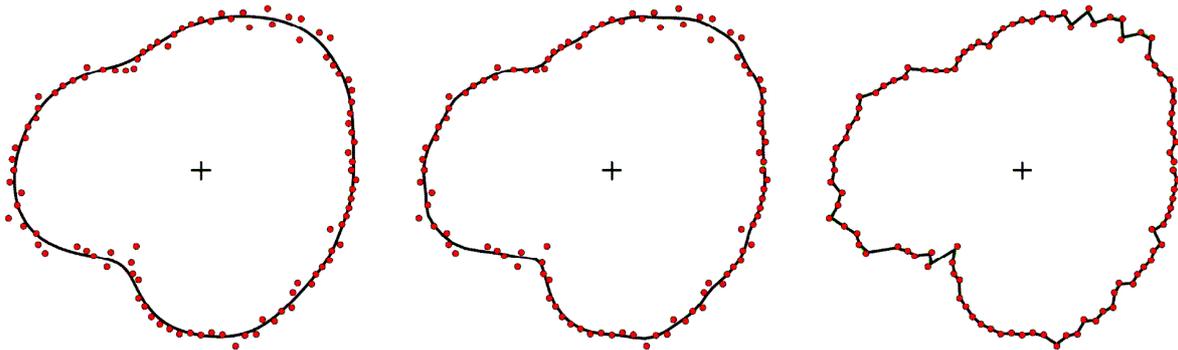


Bild 4: Filterung der Messwerte aus Bild 2 mit Gaußfilter; links 7,85 W/U, mitte 15 W/U, rechts 50 W/U

4. Filterarten

Grundsätzlich kann jeder beliebige Funktionsansatz gewählt werden, um den mittleren Oberflächenverlauf zu beschreiben. Ob die Funktion zu den Messwerten passt, lässt sich anhand der Testwerte ξ_1 und ξ_2 feststellen. Bei Oberflächen ist es allerdings schwierig, über die Nenngeometrie hinaus (Gerade, Kreis usw.) eine Prognose über eine geeignete Funktion zu stellen. Hier sind flexible Funktionen im Vorteil, die sich automatisch an den Oberflächenverlauf anpassen, z.B. Gaußfilter [7] und Splinefilter nach ISO 16610-22 [10].

Daneben kann die Harmonische Analyse angewendet werden. Mit den oben beschriebenen Tests lassen sich auch hier zufällige und systematische Messwertanteile voneinander trennen. Die Harmonischen mit den großen Amplituden werden zu einem mittleren Oberflächenprofil zusammengesetzt, und der Rest liefert die Messunsicherheit [11].

Die Filter lassen sich danach unterscheiden, ob sie entweder eine geschlossene Beschreibung des Oberflächenverlaufs liefern, oder nur für die mehr oder weniger willkürlich ausgewählten Messstellen. Zu den ersteren gehören die Splinefilter und die Harmonische Analyse, zu den letzteren das Gaußfilter. Üblicherweise wird wie im Bild 4 das durchgezogene mittlere Profil dargestellt. Tatsächlich werden aber nur die Funktionswerte an den Messstellen berechnet, und dazwischen liegen keine Informationen vor.

Das mittlere Profil hängt weniger von der Art des Filters ab, sondern hauptsächlich von der Grenzwellenzahl bzw. -länge. Im Bild 5 werden Gaußfilter, Splinefilter und Harmonische Analyse gegenübergestellt. Die Grenzwellenzahlen sind ähnlich, die mittleren Profile und die Standardabweichung s_R der zufälligen Restabweichungen fast identisch.

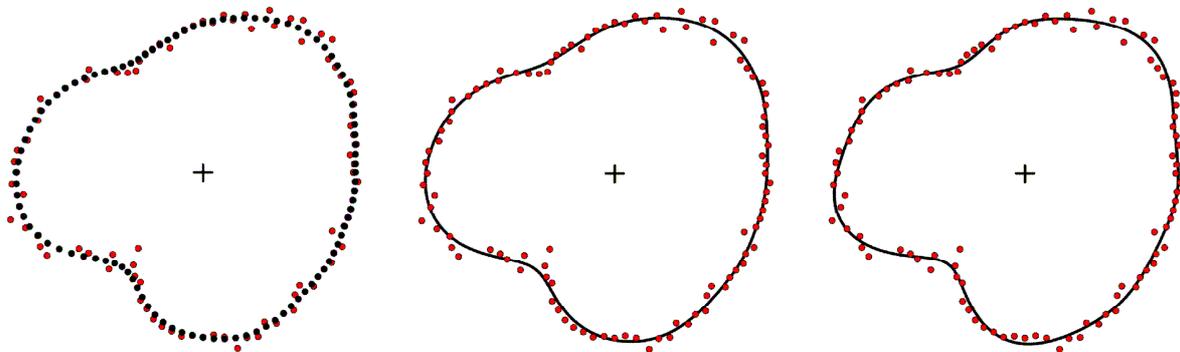


Bild 5: Filterung der Messwerte aus Bild 2 bzw. 4 mit einem Gaußfilter (links, 7,85 W/U und $s_R=1,47 \mu\text{m}$) und mit einem Splinefilter (mitte, 6,6 W/U und $s_R=1,52 \mu\text{m}$) und durch Harmonische Analyse (rechts, 2-7 W/U und $s_R=1,53 \mu\text{m}$)

Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Verwendung der mittleren Profile bzw. Oberflächen. Beim Gaußfilter sind nur die Punkte an den Messstellen bekannt, beim Splinefilter und bei der Harmonischen Analyse erhält man eine geschlossene Beschreibung der Oberfläche. Während man aber im Bild 5 rechts das mittlere Profil durch nur 12 Parameter (als Summe der 2. bis 7. Harmonischen) beschreiben kann, braucht man beim Splinefilter genausoviele Stützstellen wie Messwerte. Bei der Harmonischen Analyse wird also die Anzahl der Parameter reduziert, beim Gaußfilter und beim Splinefilter nicht.

In einem Kalibrierschein müssen dann so viele Punkte der gefilterten mittleren Oberfläche angegeben werden, wie es Messpunkte gibt. Die zusätzliche Schwierigkeit ist, dass bei einer Korrektur, z.B. für die systematischen Abweichungen der Messeinrichtung, die Messstellen in der Regel andere sind als bei der Kalibrierung. Bei der Harmonischen Analyse und beim Splinefilter lassen sich im Prinzip zwar die Funktionswerte zwischen den Messstellen berechnen, aber nur, wenn dem Anwender auch der entsprechende Formelapparat zu Verfügung steht. Beim Gaußfilter könnte wie im Bild 4 linear interpoliert werden, und das mathematische Modell der Messung müsste dann als zusätzliche Eingangsgröße die Abweichung der interpolierten von den bekannten Oberflächenpunkten enthalten.

Eine Alternative ist, den Verlauf der mittleren Oberfläche durch eine neue Näherungsfunktion so zu interpolieren, dass die Abweichungen zu den bekannten Punkten gerade verschwinden, dazwischen aber keine Geraden, sondern Kurven berechnet werden. Das kann man

z.B. durch die erneute Anwendung des Splinefilters mit einer größeren Grenzwellenzahl bzw. kleineren Grenzwellenlänge erreichen. Aber auch hier weicht das neue mittlere Profil von dem ursprünglichen ab – die Abweichungen sind nur kleiner.

5. Modell für Oberflächenmessungen

Mit der Trennung der systematischen und zufälligen Abweichungen ist noch nichts über ihre Ursachen bekannt, da sich die verschiedenen Einflüsse überlagern. Grundsätzlich lässt sich mit einer begrenzten Anzahl von Messwerten immer nur eine mehr oder weniger gute Annäherung der erfassten an die wirkliche Oberfläche erzielen. Der Grad der Annäherung hängt von der Oberfläche selbst, der Messpunktanzahl bzw. -dichte und der Genauigkeit der Messeinrichtung ab. Aus den erfassten Messwerten kann also nicht direkt auf die gesamte Oberfläche zurückgeschlossen werden. Immerhin lässt sich angeben, wie gut die Annäherung ist. Dazu wird das folgende Modell betrachtet (Bild 6).

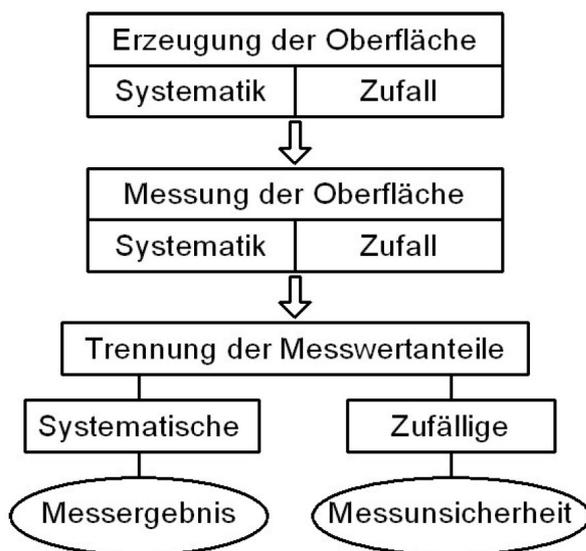


Bild 6: Modell für Oberflächenmessungen

Bei der Erzeugung der Oberfläche überlagern sich systematische und zufällige Einflüsse. Beide prägen sich auf der wirklichen Oberfläche aus. Bei der Messung überlagern sich wieder systematische und zufällige Einflüsse, z.B. durch die willkürliche Wahl einzelner Oberflächenpunkte, die zufällige Streuung der Messeinrichtung und ihre systematischen Abweichungen. Mit den oben erwähnten Tests lassen sich zunächst nur die systematischen von den zufälligen Abweichungen trennen, ohne dass man sie der Erzeugung oder der Messung zuordnen könnte. Das Modell für die geometrische Messgröße Y lautet allgemein:

$$Y = f(X_O) \quad (3)$$

Dabei beschreibt die Funktion $f(X_O)$ den mittleren Verlauf der Oberfläche des Messobjekts. Zusätzlich erhält man die Standardabweichung s_{OR} der zufälligen Restabweichungen.

In der Regel lassen sich die systematischen Messabweichungen der Messeinrichtung bestimmen, indem z.B. ein geeignetes Normal mit hinreichend kleinen bzw. genau bekannten systematischen Abweichungen gemessen wird. Diese Abweichungen lassen sich ebenfalls nach dem oben beschriebenen Vorgehen ermitteln, und man erhält eine Funktion $f(X_M)$ für den mittleren Verlauf der systematischen Messabweichungen sowie die Standardabweichung s_{MR} der zufälligen Restabweichungen der Messung. Dann kann man die Abweichungen der Messeinrichtung korrigieren, und das Modell (3) wird erweitert:

$$Y = f(X_O) - f(X_M) \quad (4)$$

Die kleinstmögliche Standardabweichung s_{MRmin} der Messeinrichtung lässt sich durch Messungen an Normalen bestimmen, die vernachlässigbar kleine Formabweichungen haben. Damit steht eine weitere Kenngröße zur Bewertung der Restabweichungen bei der Messung eines beliebigen Objektes zur Verfügung: Solange die Standardabweichung aus dieser Messung größer ist als s_{MRmin} , enthalten die Restabweichungen der Messwerte nach der Filterung noch Anteile, die sich auf die begrenzte Erfassung der Oberfläche mit relativ wenigen Messpunkten zurückführen lassen. In solchen Fällen lässt sich die Genauigkeit durch Messungen mit mehr Punkten verbessern.

Ob das notwendig ist, kann z.B. anhand des Kennwertes der Messprozesseignung nach VDI/VDE 2600-1 [12] bewertet werden. Dazu wird die Messunsicherheit U der Messung ins Verhältnis zur Toleranz T der Messgröße gesetzt und mit dem vorgegeben Grenzwert verglichen. Ist die Unsicherheit schon klein genug, braucht sie nicht mehr verringert werden. Der Grenzwert soll nach der Goldenen Regel der Messtechnik etwa zwischen einem Zehntel und einem Fünftel der Toleranz liegen.

6. Messunsicherheit

Im Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM) [13] wird vorausgesetzt, dass der Messwert der beste Schätzwert der Messgröße ist. Diese Forderung ist immer dann erfüllt, wenn z.B. ein Mittelwert aus einzelnen Messwerten bestimmt wurde. Nicht erfüllt ist die Forderung, wenn die Messgröße als Extremwert definiert ist, z.B. als Spannweite der Abweichungen einer begrenzte Menge von Oberflächenpunkten von einem geometrisch idealen Element. Das betrifft unter anderem alle Formabweichungen nach ISO 1101 [4].

Wegen der nicht erfüllten Voraussetzung des GUM werden dann häufig besondere Methoden der Extremwertstatistik angewendet, um die Messunsicherheit zu ermitteln. Diese Methoden nehmen aber in der Regel keine Rücksicht auf die Frage, ob die Abweichungen der Messpunkte von den geometrisch idealen Elementen tatsächlich zufällig sind, oder ob sie vielleicht noch systematische Anteile enthalten. Es werden also statistische Gesetzmäßigkeiten angewendet, für die gar keine Voraussetzungen vorliegen.

Die tiefpassgefilterte mittlere Oberfläche nach Kapitel 3 und 4 erfüllt aber die Voraussetzung des GUM, und dafür lassen sich mit der Standardabweichung der zufälligen Restabweichungen die Messunsicherheiten berechnen. Über die Unsicherheiten für die Harmonische Analyse, das Gaußfilter und das Splinefilter wurde schon an anderen Stellen berichtet [14] [15] [11]. Diese Betrachtungen lassen sich unter Berücksichtigung der Funktion erweitern.

7. Funktionsorientierte Auswertung

Die tiefpassgefilterten mittleren Oberflächen bieten die Grundlage zur Berechnung der funktionsgerechten angrenzenden Elemente, z.B. das kleinste umschriebene Element (Hüllkreis) nach ISO 14405-1 [3]. Die Messunsicherheit dieser Elemente ist ähnlich groß wie die des mittleren Profils. Das Bild 7 zeigt links den Hüllkreis an das mittlere Profil für das Gaußfilter mit den Standardunsicherheiten. Mit diesem mittleren Profil lassen sich jetzt z.B. auch Formabweichungen entsprechend der Minimum-Bedingung in ISO 1101 [4] mit kleinen Messunsicherheiten bestimmen.

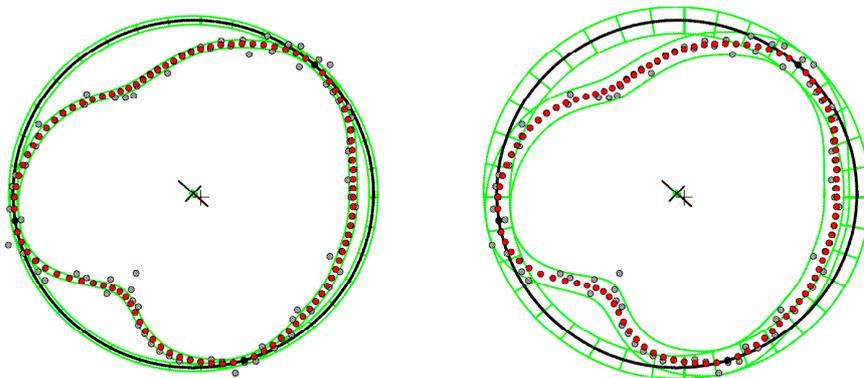


Bild 7: Hüllkreise mit erweiterten Messunsicherheiten für die Standardunsicherheit des mittleren Profils (links) und mit der Reststreuung der Abweichungen (rechts)

Beim Gaußfilter liegt der Hüllkreis an den drei am weitesten außen liegenden Punkten an. Beim Splinefilter und der Harmonischen Analyse ist das mittlere Profil dagegen lückenlos bekannt, und die Anlagepunkte können auch zwischen den Messstellen liegen.

Das praktische Problem ist in allen Fällen jedoch, dass immer einige Messpunkte außerhalb des an die mittlere Oberfläche angrenzenden Elements liegen. Eine Welle würde deshalb nicht unbedingt in die Bohrung mit diesem Durchmesser passen. Bei den Abweichungen der Messpunkte lässt sich zunächst nicht eindeutig sagen, ob sie systematischer oder zufälliger Natur sind. Die statistischen Testwerte ξ_1 und ξ_2 weisen sie als zufällige Abweichungen aus, der Vergleich mit der kleinstmöglichen Reststreuung s_{MRmin} der Messeinrichtung deutet aber auf mögliche nicht erfasste systematische Anteile. Für den Durchmesser des Hüllkreises muss deshalb das Modell erweitert werden:

$$D_{Hüll,korr} = D_{Hüll} + \delta D_{Hüll} \quad (5)$$

Die unbekannte Abweichung $\delta D_{Hüll}$ des Hüllkreisdurchmessers wird mit der Standardabweichung s_{OR} der zufälligen Restabweichungen aus der Messung des Objekts abgeschätzt. Die Messunsicherheit wird damit deutlich größer. Das Bild 7 zeigt rechts die entsprechenden erweiterten Messunsicherheiten des Hüllkreises. Ob die Unsicherheit U des Hüllkreisdurchmessers ausreichend klein ist, lässt sich wieder mit dem Verhältnis zur Toleranz T im Vergleich zum Grenzwert der Messprozesseignung bewerten.

Das erweiterte Modell (5) gilt sinngemäß für alle angrenzenden Elemente mit direktem Oberflächenkontakt, also auch für die Koordinaten der Oberflächen von Bezugsebenen nach ISO 5459. Die Unsicherheiten der Mittelpunktkoordinaten und der Winkel der Formelemente werden in jedem Fall ohne die Streuung der Restabweichungen berechnet. Sie sind im Bild 7 links und rechts gleich.

Das Modell (5) ist natürlich nicht vollständig. Dazu kommen noch weitere Eingangsgrößen wie die Abweichungen der Messeinrichtung selbst z.B. nach Gl. (4) und die Temperatur. Der wesentliche Unterschied zu der bisher üblichen Berechnung der angrenzenden Elemente aus den erfassten Messpunkten ist, dass mit dem Modellansatz (5) auch der Einfluss der Messpunktanzahl bzw. -dichte auf die Messgröße und die Messunsicherheit berücksichtigt wird. Je größer die Punktzahl, desto kleiner ist dieser Beitrag – und umgekehrt.

Die beschriebene Vorgehensweise lässt sich auch auf die Messung von Freiformflächen übertragen. Es müssen nur geeignete Beschreibungen für die mittleren Oberflächen gefunden werden. Das betrifft auch und besonders die Korrektur von Abweichungen bei der Röntgen-Computertomografie (CT). Hier werden die Messunsicherheiten häufig nach VDI/VDE 2630-2.1 [16] mit kalibrierten Werkstücken bestimmt. So lassen sich aber nur bei Maßen die systematischen Abweichungen korrigieren.

8. Zusammenfassung

Bei Messungen von geometrischen Größen werden heute in der Regel die erfassten Oberflächenpunkte mit der erfassten Oberfläche gleichgesetzt. So ist aber keine Aussage darüber möglich, wie gut die Messwerte die wirkliche Oberfläche repräsentieren.

Durch die Filterung der Messwerte sollten ursprünglich die zufälligen Messwertanteile abgeschnitten werden. Die heute übliche Anwendung der genormten Filter nimmt aber keine Rücksicht darauf, ob tatsächlich Systematik und Zufall getrennt werden.

Die Zufallseigenschaft lässt sich mit einfachen und objektiven statistischen Tests prüfen. Durch die schrittweise Filterung mit variablen Grenzwellenlängen bzw. -wellenzahlen können die zufälligen von den systematischen Messwertanteilen getrennt werden. Die systematischen beschreiben den mittleren Oberflächenverlauf, aus den zufälligen werden die Messunsicherheiten berechnet. Sie enthalten auch den Einfluss der unvollständigen Erfassung der Oberfläche mit der begrenzten Messpunktanzahl bzw. -dichte. Mit dem Verhältnis der Messunsicherheit zur Toleranz im Vergleich zum vorgegebenen Grenzwert lässt sich die Messprozesseignung bewerten.

Ist die Reststreuung der zufälligen Abweichungen bei der Messung eines beliebigen Objektes größer als die minimale Reststreuung der Messeinrichtung, ist darin die unvollständige Erfassung der Oberfläche enthalten. Bei der Berechnung von funktionsgerechten angrenzenden Formelementen liegen immer einige Messpunkte außerhalb dieser Elemente. Dann muss die Messunsicherheit mit der Reststreuung der Messpunkte von der mittleren Oberfläche bestimmt werden.

Welche Art Filter eingesetzt werden, ist zweirangig. Sie unterscheiden sich im wesentlichen durch die Möglichkeit, die mittlere Oberfläche entweder an einzelnen Punkten oder als stetige Funktion zu beschreiben. In Kalibrierscheinen werden in der Regel nur einzelne Punkte angegeben, die dann zur Korrektur von Messabweichungen interpoliert werden müssen.

9. Literatur

- [1] DIN EN ISO 8015: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln. Beuth Verlag Berlin 2011
- [2] DIN EN ISO 14660-1: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Geometrie-elemente – Teil 1: Grundbegriffe und Definitionen. Beuth Verlag Berlin 1999
- [3] DIN EN ISO 14405-1: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 1: Längenmaße. Beuth Verlag Berlin 2011

- [4] DIN EN ISO 1101: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Beuth Verlag Berlin 2014
- [5] DIN EN ISO 5459: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme. Beuth Verlag Berlin 2011
- [6] ISO 16610-40: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 40: Morphologische Profilfilter: Grundlegende Konzepte. Beuth Verlag Berlin 2015
- [7] DIN EN ISO 16610-21: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter. Beuth Verlag Berlin 2013
- [8] VDI/VDE 2631 Blatt 3: Formprüfung – Eigenschaften und Auswahl von Filtern. Beuth Verlag Berlin 2007
- [9] DIN 1319-4: Grundlagen der Messtechnik – Teil 4: Auswertung von Messungen; Messunsicherheit. Beuth Verlag Berlin 1999
- [10] ISO 16610-22: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 21: Lineare Profilfilter: Spline-Filter. Beuth Verlag Berlin 2015
- [11] Hernla, M.: Abschätzung der Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen unter den Bedingungen der industriellen Fertigung. VDI-Fortschrittberichte, Reihe 2, Nr. 274, VDI-Verlag Düsseldorf 1992
- [12] VDI/VDE 2600-1: Prüfprozessmanagement – Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweise von Prüfprozessen. Beuth Verlag Berlin 2013
- [13] JCGM 100: Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Sèvres 2008 (www.bipm.org)
- [14] Krystek, M.: Einfluss des Wellenfilters auf die Unsicherheit eines Messergebnisses bei Rauheitsmessungen. DIN-Tagung Geometrische Produktspezifikation und -prüfung. Beuth Verlag Berlin 1999
- [15] Hernla, M.: Anwendung von Filtern bei der Auswertung gemessener Oberflächenprofile. tm – Technisches Messen, München 67 (2000) 3, S. 128-135
- [16] VDI/VDE 2630-2.1: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik – Bestimmung der Messunsicherheit und der Prüfprozesseignung von Koordinatenmessgeräten mit CT-Sensoren. Beuth Verlag Berlin 2015