

Optimierung der Qualitätskontrolle bei Koordinatenmessgeräten hinsichtlich der Messproduktivität

Jan Urban¹, Rudolf Dvořák¹, Libor Beránek¹, Jan Šimota¹, Petr Mikeš¹, Karel Tillinger²

¹ *Tschechische Technische Universität Prag, Fakultät für Maschinenbau, Institut der Bearbeitungstechnik, Projektierung und Metrologie, Technická 4, 166 07 Prag 6, Tschechische Republik*

² *Carl Zeiss – Industrieleemesstechnik, Radlická 14/3201, Prag 5, Tschechische Republik*

Abstrakt

Unter Berücksichtigung der Minimierung von Problemen im Produktionsprozess geht die Entwicklung von Bearbeitungsmaschinen stets voran. Im Zusammenhang mit der immer genaueren Produktion müssen diesem Trend auch die Arten der Kontrollen angepasst werden. Dank diesem Trend finden Messgeräte in den Produktionsbetrieben durch ihren universellen Einsatz, Geschwindigkeit und Genauigkeit immer mehr Anwendung. Mit der steigenden Produktivität der Maschinen wachsen jedoch auch die Anforderungen an die Produktivität der CMM-Maschinen. Die Anschaffung und Integration eines neuen Messsystems ist in der Regel eine sehr aufwendige Investition, und daher ist eine maximale Nutzung der Kapazität bestehender Prüfanlagen anzustreben. In fast allen Produktionsbetrieben wurde die Optimierung von Fertigungsprozessen zum Standard. Mit Systemen für Maßkontrolle hat sich jedoch aus dem Gesichtspunkt der Zeitaufwendigkeit noch niemand ordentlich befasst.

Schlüsselwörter

–

Messungsoptimierung,

CMM-Produktivität,

Messmittelfähigkeit.

1. Einleitung

Die industrielle Produktion verzeichnete in den letzten Jahrzehnten eine riesige Entwicklung. Heutzutage ist es daher nicht mehr schwierig, hochkomplexe Formen von Teilen herzustellen, deren Anforderungen an die Maßgenauigkeit sich im Bereich von einzelnen Mikrometern befinden. Hochspezialisierte Maschinen sind dann fähig, auch unter der Grenze von 1 µm zu produzieren. Eine so genaue Fertigung müssen wir aber auch kontrollieren können. Gerade dazu dienen sehr gut die Koordinatenmessgeräte (CMM). Sie finden in der Produktion gerade deshalb ihre Anwendung, weil sie schnell, universell und vor allem genau sind. Die Anschaffung einer solchen Anlage ist jedoch sehr teuer und bewegt sich im sechsstelligen Bereich in Euro. Die erfolgreiche Einbindung der CMM in den Prozess der Maßkontrolle wird anhand einer sog. Messmittelfähigkeit bewertet, die die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen auswertet. In den meisten Firmen, die CMM-Geräte verwenden, werden dann die Messprogramme so erstellt, dass der Fähigkeitswert so hoch wie möglich ist. Aus theoretischer Hinsicht ist dies zu verstehen, jedoch aus der praktischen Sicht handelt es sich oftmals um Fähigkeitswerte, die unsinnig hoch sind. Es ist wissenschaftlich nachgewiesen, dass eine genaue Messung langsame Messung bedeutet. Durch eine geeignete Anpassung der Strategie der Punktaufnahme, vor allem vom Parameter der Sensorbewegungsgeschwindigkeit, kann man die Messung optimieren. Aufrechterhalten bleibt jedoch die Bedingung, dass man bei der Messmittelfähigkeit die Grenze der minimalen Fähigkeit nicht unterschreiten darf. Diese Optimierung bringt dann eine Erhöhung der Kapazität der Messanlage, die z. B. bei der Erweiterung vom Fertigungsportfo-

lio oder bei einer bloßen Aufstockung des Produktionsvolumens geschätzt wird. Ferner kann man mit dieser Methode bedeutende Finanzmittel sparen, die man bei der Produktionserweiterung für den Kauf einer neuen Messanlagen aufwenden müsste.

2. Möglichkeiten der Punktaufnahme beim CMM

Punkte kann man vom gemessenen Teil heute auf zwei Arten extrahieren:

1. Berührungslos (optisch)
2. Mit Berührung (taktil)

Zu 1. Der berührungslose Scan ist mit einer hohen Produktivität der Punkteextraktion verbunden. Die Anzahl der Punkte, die wir vom Messteil einscannen können, unterscheidet sich je nach Typ und weiteren Parametern des Scansystems. Heutzutage kann man zur Extraktion der Punkte CCD-Sensoren oder Laser-Scanner verwenden, die unter idealen Bedingungen Hunderte von Punkten pro Sekunde aufnehmen können. Die genaue Anzahl ist von den technischen Parametern von jedem Sensor abhängig. Das technische Highlight einer berührungslosen Aufnahme ist dann ein Gerät auf dem Prinzip der Computertomographie, wo man ein Volumen von Tausenden bis Hunderttausenden von Punkten pro Sekunde erreichen kann.[1]

Der Nachteil der berührungslosen Extraktionsmethode von Punkten besteht in der niedrigeren und wechselnden

* der Kontakt auf der Autor: Jan.Urban@fs.cvut.cz

Genauigkeit gegenüber den taktilen Methoden. Die Ursache liegt dabei in der hohen Empfindlichkeit des optischen Systems gegenüber der Qualität und Reflexionsvermögen des Messfläche und Unveränderlichkeit der Lichtverhältnisse bei der Messung. Auch wenn die optischen Scanmethoden sehr produktiv sind, eignen sie sich für Teile mit einer hohen Anzahl an Formflächen, Teile mit matter Oberfläche (z. B. Gussteile, usw.), Teile mit ausreichend breitem Toleranzfeld u. ä. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist dann das Reverse Engineering. [1]



Bild 1 – Aufnahmesysteme von der Gesellschaft Zeiss – Links der optische Sensor LineScan, rechts das taktile System VAST [4]

Zu 2. Das taktile Scansystem nutzt den physischen Kontakt des Sensors mit dem Messteil. Es gibt zwei Grundtypen vom taktilen Scansystem:

- a) Systeme mit festem Kopf (siehe Abb. 1 links)
- b) Systeme mit indexierbarem Kopf (siehe Abb. 2)

Zu a) Systeme mit festem Kopf verfügen über eine relativ hohe Vielzahl an Teilen, aus denen man die notwendige Konfiguration auch für die anspruchsvollsten Messungen zusammenstellen kann. Die einzige Einschränkung ist das Gesamtgewicht, das die Tragfähigkeit des Scankopfes nicht überschreiten darf. Die Komponenten dieses Systems werden heutzutage aus temperaturstabilen Werkstoffen produziert, wie z. B. kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, Keramik, usw. Dies stellt vor allem eine gute Temperaturstabilität sicher. Zu den Vorteilen zählt eine sehr gute Genauigkeit, universeller Einsatz und günstiger Preis. Die modernen taktilen Scansysteme können heutzutage nicht nur im Punktmodus, sondern auch im Scanmodus aufnehmen. Diese Funktion erhöht ihre Produktivität und Einsatzmöglichkeiten. Dank diesen Eigenschaften ist das taktile Aufnahmesystem mit festem Kopf die meist verbreitete Methode der Extraktion von Punkten bei den meisten CMM. [1]

Ad b) Systeme mit indexierbarem Kopf arbeiten auf dem gleichen Prinzip, wie die Systeme mit festem Kopf. Dieser Kopf ermöglicht das Drehen des Sensors in einzelnen Achsen und seine Arretierung in der gewünschten Lage. Dadurch entfällt die Zusammenstellung von komplexen Konfigurationen und die Vorbereitungsarbeiten vor der Erstellung des Messplans werden vereinfacht. Die Positionierung wird durch ein Gelenksystem ermöglicht, das man entweder manuell (manueller Kopf), oder über eine Steuerungssoftware (motorische Köpfe) bewegen kann. Auch diese Systeme sind fähig, Punkte im Scanmodus aufzunehmen, was genauso wie bei den festen Köpfen ihre Produktivität erhöht. Der Nachteil ist jedoch eine niedrigere Genauigkeit gegenüber Tastköpfen mit einem festen Kopf. Der Grund ist gerade der Gelenkmechanismus, der ein bestimmtes Maß an Positionierfehlern aufweist, das eine Ungenauigkeit in das gesamte Messsystem hineinbringt. Daher wird dieses System vor allem bei der Kontrolle von größeren Pressteilen verwendet, wo keine hohen Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden, jedoch eher an die Zeit der Vorbereitungsarbeiten und Messdauer selbst. [1]



Bild 2 – Indexierbares Scansystem Zeiss[4]

3. Messstrategie

Unter dem Begriff Messstrategie kann man sich eine Kombination aus Parameter den Sensorbewegungen, Abstand der gescannten Punkte, Messdatenfilterung und anschließende Auswertung von sämtlichen gescannten Punkten mit Hilfe der richtigen Methode vorstellen. Bei der Festlegung der Messstrategie muss der CMM-Bediener besonders vorsichtig sein, weil vor allem eine unpassend gewählte Geschwindigkeit und Auswertung der erworbenen Daten das gesamte Messergebnis bedeutend beeinflussen. Falsch eingestellte Parameter kann man später bei der Auswertung der Wiederholbarkeit der Messung entdecken. [B]



Bild 3 – Grafisches Beispiel der Messstrategie für einen Ventilsitz am Verbrennungsmotorkopf [5]

Die Messstrategie beeinflusst auf bedeutende Weise neben der Qualität der Messdaten auch die Programmlaufzeit der CMM-Maschine. Besonders in der heutigen Zeit von hochproduktiven Fertigungsmaschinen stoßen die meisten Betriebe an die Grenzen der Koordinatentechnik, die auch trotz ihrer enormen Entwicklung den Schritt mit der produktiven Fertigung nicht halten kann. [2]

Zu der Strategie der Punkteextraktion gehören folgende Parameter:

1. Scangeschwindigkeit (nur beim Scanmodus)
2. Abstand zwischen einzelnen Punkten (Schritt)
3. Länge und Form des Sensorweges
4. Filterung und Ausschluss von Punkten
5. Auswertung der Punkte

Sämtliche vorgenannten Parameter haben einen Einfluss sowohl auf die Qualität der gescannten Punkte, als auch auf die Laufzeit vom gesamten Messzyklus. Durch eine geeignete Kombination kann man eine akzeptable Messgenauigkeit und Prüfdauer erreichen. Bei der Eingabe der Geschwindigkeit sollte der Bediener auch den Typ und Größe der Messcharakteristik, Form und Größe der Sensorkonfiguration und die Gesamtbreite des Toleranzfeldes vom Messobjekt betrachten. [2]

Im Falle vom Abstand der einzelnen Punkte muss auch der Typ der auszuwertenden Charakteristik (Spezifikation von Form, Lage und Abmessungen), und das Tole-

ranzfeld berücksichtigt werden. Hand in Hand mit der Eingabe des Abstands zwischen den einzelnen Punkten geht auch die Festlegung der Weglänge und nicht zuletzt auch die Einstellung der Filterung von Punkten, Ausschluss von Ausreißern und Auswertungsmethode der einzelnen Punkte. Mit einer falsch gewählten Auswertungsmethode kann man den resultierenden Messwert sehr bedeutend beeinflussen. Zu den Auswertungsmethoden gehören folgende Vorgehensweisen. [2]

- Gauß-Verfahren (Methode der kleinsten Quadrate)
- Minimales/maximales Element
- Tangentiales Element (außen innen)
- Umelement / Inelement (kleinstes / größtes)

Jedliches abgetastetes Profil beinhaltet in sich immer den Einfluss der Welligkeit und Form. Alle drei Typen von Ungleichheiten müssen separat ausgewertet werden. Durch Einstellung des geeigneten Filterungswertes kann man einzelne Typen von Ungleichheiten voneinander trennen und die Schnittstelle zwischen der Welligkeit und kurzen oder längeren Wellenbestandteilen bestimmen. Die Oberflächenrauheit macht sich bei der Koordinatenmessung nicht bemerkbar, da überwiegend Berührungen mit einer Kugel mit nur ein paar Millimetern Größe eingesetzt werden, die nicht imstande sind, den Einfluss der Rauheit aufzuzeichnen. [2]

Aus dem vorgenannten Text geht hervor, dass die richtige Einstellung der Messstrategie eine komplexe Problematik darstellt und diese mit erhöhter Aufmerksamkeit durchzuführen ist. Im Falle von Anforderungen an die Produktivität vom Messprozess ist es klar, dass die größten Ersparnisse bei der Programmlaufzeit durch Anpassung der Geschwindigkeit erreicht werden.

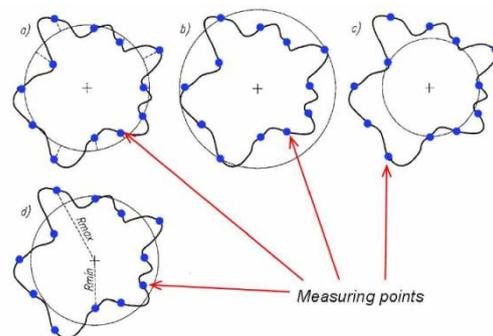


Bild 4 – Grafische Darstellung der Auswertungsmöglichkeiten von Messpunkten [6]

4. Durchführung eines Verifizierungsversuches

Bei der Erstellung dieser Arbeit wurden freie Kapazitäten in der Aggregatproduktion der Gesellschaft ŠKODA AUTO a.s. in Anspruch genommen. Hierbei wurde eine von der Form her komplexeres Teil ausgewählt, bei dessen Kontrolle die meisten Abmessungs-, und ach Formcharakteristiken ausgewertet wird. Konkret handelt es sich um den Zylinderkopf für den 1.0 MPI-Motor im ersten und zweiten Fertigungsschritt. Das Ziel dieser ersten Bemühung war die Prüfung, ob es Sinn hat, mit der Arbeit fortzufahren und ob diese Versuchsoptimierung ein beitragendes Ergebnis haben wird.



Bild 5 – Teil für den Versuch – Zylinderkopf des Verbrennungsmotors 1,0 MPI

Die ganze Arbeit umfasste auch die Analyse der gleichzeitig angewendeten Messstrategie. Anschließend wurde eine sog. Etalonmessung an einer Maschine mit einer höheren Genauigkeit durchgeführt. Für diese Zwecke wurde das Laborgerät Zeiss UPMC 850 eingesetzt, dessen Grundmessunsicherheit unter $1\mu\text{m}$ liegt. Diese Werte werden dann zur Berechnung vom Koeffizienten C_g verwendet.

Die Beziehungen für die Berechnung vom Koeffizienten der Messmittelfähigkeit sind wie folgt

$$c_g = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s_g} \quad (1)$$

$$c_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - |\bar{x}_g - x_m|}{3 \cdot s_g} \quad (2)$$

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_g)^2} \quad (3)$$

Wobei: T - ist die Toleranz der gemessenen Abmessung,

s_g - ist die maßgebende Auswahlabweichung der Messergebnisse am Kontrolletalon,
n - ist die Anzahl der Messungen unter den Wiederholbarkeitsbedingungen (mind. 25),
 x_i - ist das Ergebnis der i-ten Messung
 \bar{x}_g - ist der Auswahldurchschnitt der Messergebnisse am Kontrolletalon [3]

Der zweite Schritt war die erste Messung mit dem Ziel, Eingangswerte der Koeffizienten der Messmittelfähigkeit C_g a C_{gk} zu erhalten. Basierend auf dem Prinzip der Kinematik der CMM-Maschine ist klar, dass den größten Einfluss auf die Messergebnisse sicher die Geschwindigkeit hat. Der Grund dafür ist, dass mit der steigenden Bewegungsgeschwindigkeit vom Scansystem über die Flächen vom Teil die kinematischen Wirkungen der beweglichen Teile auf den Sensor wachsen, die von der Sensoriksteuerung ausgeglichen werden müssen. Gleichzeitig hat jedoch die Bewegungsgeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Programmlaufzeit.

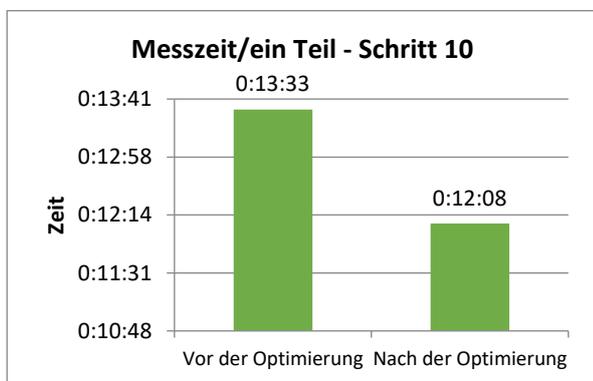
Zur Messung wurde das Gerät Zeiss MC 850 verwendet, das im Jahre 2015 einer Generalüberholung unterzogen wurde. Es ist also mit einem aktiven Scansystem Vast bestückt und die Grundmessunsicherheit bei der Längenmessung beträgt $1,0\mu\text{m}$. Die Bedingungen während des Programmlaufs waren relativ stabil. Die Temperatur im Labor war $21,5\text{ }^\circ\text{C}$ mit einer Abweichung während der Messung von $\pm 0,3\text{ }^\circ\text{C}$.

Die eigentliche Optimierung beruhte auf der Modifikation der Geschwindigkeit bei der Punkteaufnahme nach dem Fähigkeitswert des ursprünglichen Programms und anschließende 10fache Messung von einem Teil. Die auf diese Weise gewonnenen Daten wurden erneut ausgewertet und mit dem vorherigen Zustand wurde der Zeitaufwand und Änderung der Koeffizienten der Messmittelfähigkeit einzelner Elemente verglichen. Ein anschauliches Beispiel der Entwicklung von Fähigkeitswerten bei einigen ausgewählten Charakteristiken zeigt die Tabelle 1. Während der ganzen Arbeit galt die Bedingung, dass die Messmittelfähigkeit bei allen ausgewerteten Charakteristiken nicht unter die Fähigkeitsgrenze mit dem Wert von 1,33 sinken durfte. Die Auswertung erfolgte für die ersten beiden Bearbeitungsschritte, die als Schritt 10 und Schritt 20 bezeichnet wurden.

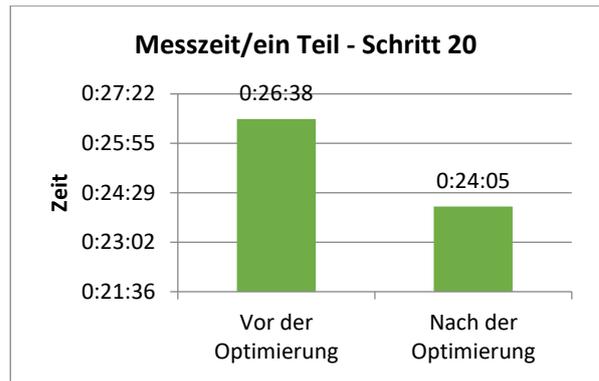
Tab. 1 – *Ergebnisse ausgewählter Charakteristiken während der Optimierung.*

Fähigkeit der Messelementen	Originalprogramm		Optimierung 1		Optimierung 2	
	Cg	Cgk	Cg	Cgk	Cg	Cgk
Flächenheit 5F3_5F4_H	39,52	36,68	10,9	9,25	3,3	2,53
52B10_D	69	65,76	28,28	27,32	24,18	23,89
1B10_POS	5,73	5,32	47,33	46,18	32,14	29,95
Einstellung der Geschwindigkeiten	Originalprogramm		Optimierung 1		Optimierung 2	
Flächenheit 5F3_5F4_H	10		12,5		15	
52B10_D	3		4		7,5	
1B10_POS	10		12,5		15	

Die Auswertung selbst brachte die Feststellung, dass die durch Modifikation von Parametern der Abtastgeschwindigkeit gewonnene Zeitersparnis beim Schritt 10 eine Reduktion der notwendigen Zeit von ursprünglichen 13,5 Minuten/Stück auf 12 Min./St. brachte, was einer Zeitersparnis in der Höhe von 10,5 % entspricht. Bei dem zweiten Schritt belief sich die ursprüngliche Messdauer auf 26 Minuten 38 Sekunden und nach der Optimierung dauerte die Programmlaufzeit 24 Minuten 5 Sekunden. Die Zeitersparnis beträgt also 2 Minuten 33 Sekunden pro Teil, und dies entspricht auch ungefähr 10 %. Beide Messergebnisse werden in den Grafiken 1 und 2 dargestellt. Es ist jedoch zu erwähnen, dass es sich lediglich um eine Kontrolle von ersten zwei Fertigungsschritten an einem relativ komplizierten Teil handelt, auf die weitere, noch viel komplexere Fertigungsschritte anknüpfen, deren durchschnittlicher Zeitaufwand bei der Messung sich um 55 Minuten bewegt. Es ist davon auszugehen, dass die Zeitersparnis anhand dieser Methodik zwischen 15 und 20 % liegen wird.



Grafik 1 – *Vergleich der Zeiten vor und nach Optimierung – Schritt 10*



Grafik 2 – *Vergleich der Zeiten vor und nach Optimierung – Schritt 20*

4. Abschluss

Die Ergebnisse vom Experiment haben den Beitrag der Optimierung von Messungen mit Hilfe der angeführten Methodik nachgewiesen. Beide optimierten Operationen brachten eine Ersparnis des Zeitaufwands in der Höhe von 10 % gegenüber der ursprünglichen Programmlaufzeit gebracht. Ein so optimiertes Programm ist zudem vollständig für die Maßkontrolle in der Produktion nutzbar, weil die Messmittelfähigkeit nach der Methodik zur Auswertung bei der Messung von allen geometrischen Elementen unter den Grenzwert von 1,33 nicht gesunken ist. Die resultierenden Zeitersparnisse der Optimierungstätigkeit kann man jedoch nicht als endgültig bezeichnen, weil einige erworbene Werte von Cg und Cgk aus der letzten Optimierung immer noch ein Modifikationspotenzial enthalten. Dies würde weitere zeitliche Einsparungen bei der Messung vom Teil bringen.

Die Programmoptimierungsmethode auf Grund der Auswertung von Koeffizienten Cg und Cgk kann eindeutig ein Vorteil für alle Gesellschaften sein, die CMM-Geräte bei der Kontrolle in ihren Fertigungsprogrammen einsetzen. Der Grund dafür ist die mögliche Erhöhung von Kapazitäten der bereits betriebenen Maschinen, wodurch es zur Aufwertung der in die Prüftechnik investierten Finanzmittel kommt. Ferner kann man mit Hilfe dieser Optimierung die Notwendigkeit der Anschaffung neuer Prüfgeräte bei einer kurzfristigen Erhöhung vom Fertigungsvolumen vorbeugen, und zwar dank der mehr freien Maschinenkapazität. Dadurch werden auch hier bedeutende Finanzmittel gespart.

Der weitere Vorteil, den der Versuch gezeigt hat, ist die Kostspieligkeit der ganzen Optimierung. Die Umsetzung erfordert einen gewissen Zeitfonds vom Mitarbeiter, der sich mit dieser Problematik beschäftigen wird. Des weiteren auch die freie Kapazität der CMM-Maschinen wegen der Durchführung der wiederholten Auswertungsmessung. Zur Festlegung von Referenzwerten ist dann das Teil zu messen, dessen Messprogramm optimiert wird, und zwar mit einem Messmittel höheren

Rangs. Dies kann man - wenn man keine solche Maschine besitzt - extern sicherstellen. Wenn wir also die Kosten für etwaige Investition in eine externe Messung oder in die Anschaffung eines neuen Messgerätes vergleicht, ist diese Methodik zur Erhöhung der Kapazitäten von CMM-Anlagen für die Fertigungsbetriebe eine sehr interessante Alternative.

Danksagung

Wir möchten uns an dieser Stelle gern bei dem Team des Messezentrums für Produktionsqualität der Aggregatherstellung der Gesellschaft Škoda auto a.s. bedanken, welche die notwendigen Komponenten beigestellt und ihre Kapazitäten der CMM-Maschinen freigestellt hat, damit dieser Beitrag entstehen konnte.

Auflistung der Symbole

C_g – Koeffizient der Messmittelfähigkeit

C_{gk} – Koeffizient der Messmittelfähigkeit

T - Toleranz der gemessenen Abmessung

S_g - maßgebende Auswahlabweichung der Messergebnisse am Kontrolletalon

n - Anzahl der Messungen unter den Wiederholbarkeitsbedingungen

x_i - Ergebnis der i-ten Messung

\bar{x}_g - Auswahldurchschnitt der Messergebnisse am Kontrolletalon

μm – Mikrometer

$^{\circ}\text{C}$ – Grad Celsius

Verwendete Quellen

- 1) URBAN, Jan. Einsatz der CMM-Technik im Rahmen der Qualitätskontrollen im kleinen und mittelständischen Betrieb. Prag, 2015. Diplomarbeit. ČVUT Prag, Fakultät für Maschinenbau Leiter der Diplomarbeit Libor Beránek.
- 2) PETŘÍK, Milan. Einfluss der ausgewählten Messstrategie auf die resultierende Kontrollfähigkeit am CMM. Prag, 2013. Bachelor-Arbeit. ČVUT Prag, Fakultät für Maschinenbau Leiter der Diplomarbeit Libor Beránek.
- 3) PERNÍKÁŘ, Jiří. AUSWERTUNG DER PRÜFMITTELFÄHIGKEIT. Brno: VUT in Brno

- 4) Werbeunterlagen der Gesellschaft Zeiss unter <http://www.zeiss.com>
- 5) Werbeunterlagen der Gesellschaft Zeiss unter <http://www.renishaw.com>
- 6) GASPINSKI, Bartosz, Mirosław GRZELKA und Mirosław RUCKI. *THE ACCURACY ANALYSIS OF THE ROUNDNESS MEASUREMENT. XVIII IMEKO WORLD CONGRESS* [online]. University of Technology Poznań, 2006, 3-4 [cit. 2017-04-02]. Zugänglich unter: <https://www.researchgate.net/publication/242761397>