

Qualitätssicherung von großen und hochwertigen Bauteilen

Das Paarungsmaß verformter Ringe im unverformten Zustand

Tobias Felstau, thyssenkrupp Rothe Erde GmbH, Lippstadt

Michael Trenk, FEINMESS GmbH & Co. KG, Bad Endbach

Rainer Bartelt, Mahr GmbH, Göttingen

Ringe für Großwälzlager kommen aus Lippstadt

Thyssenkrupp Rothe Erde ist ein international führender Hersteller von Großwälzlager. Am Standort Lippstadt werden täglich Großwälzlager für verschiedenste Anwendungsfälle gefertigt, so zum Beispiel auch für Windkraftanlagen. Ein Wälzlager besteht in der Regel aus mehreren Ringen, zwischen denen hochpräzise Rollkörper (Kugeln oder Rollen) für die Drehbewegung sorgen: Nahtlos gewalzte Ringe werden in Großgetrieben, Großventilen, Produktionsanlagen, Wälzlager, Zahnkränzen, Windenergieanlagen und im Rohrleitungsbau eingesetzt und können einen Durchmesser von bis zu 8 Metern haben. Ringe für Großwälzlager, die speziell in den Bereichen Windenergieanlagenbau, Kranbau, Baggerbau, Maschinenbau, Tunnelbohrmaschinenbau und sonstigem Maschinenbau Verwendung finden, wurden von thyssenkrupp Rothe Erde bereits mit einem Durchmesser von 18 Metern ausgeliefert.

Damit die Einzelringe zusammengefügt werden können und man außerdem sicher sein kann, dass sich das Wälzlager mit der Gegenkonstruktion des Kunden paaren lässt, ist eine möglichst genaue Kenntnis der Paarungsmaße von entscheidender Bedeutung.

Verformte Ringe richten sich

Ringe, die in Wälzlager eingebaut werden, richten sich. Das heißt: Wenn die Ringe nach der Fertigstellung langwellige Formabweichungen hatten, so werden diese durch die Kräfte, die von den Wälzkörpern ausgeübt werden, wieder ausgeglichen. Funktionsbestimmend für einen elastisch, plastisch oder temperaturbedingt verformten Wälzlagering sind also nicht die im verformten Zustand gemäß DIN EN ISO 14405, Teil 1, gemessenen Paarungsmaße (GN) oder (GX), sondern das unbekannte Paarungsmaß im unverformten Zustand, der sich nach dem Einbau automatisch einstellt.

Die Aufgabe besteht jetzt darin, dieses Maß an Wälzlageringen bereits im verformten Zustand so sicher wie möglich bestimmen zu können. Es versteht sich von selbst, dass das Paarungsmaß im unverformten Zustand zwischen dem im verformten Zustand gemessenen Pferch- (GX) und dem im verformten Zustand gemessenen Hülldurchmesser (GN) liegen muss. Durch einen entsprechenden Messversuch sollte an zwei Musterringen geklärt werden, welches der in der Norm beschriebenen Durchmesser messverfahren das Einbaumaß verformter Ringe, das heißt: das Paarungsmaß im unverformten Zustand bestmöglich vorhersagt.

Welche Durchmesserverfahren gibt es?

Seit Inkrafttreten der Normenreihe DIN EN ISO 14405 [2] stehen dem Anwender eine Vielzahl von Durchmesserdefinitionen, die wiederum verschiedenen Durchmesser messverfahren entsprechen, zur Verfügung. Bekannt dürfte hierbei neben dem Zweipunkt-Maß (LP) auch der Gauß-Durchmesser (GG) sein. Andere Durchmesser, die schon heute in der Industrie – hauptsächlich zum Nachweis der Paarungseigenschaft – angewendet werden, sind die mit den Symbolen (GN) und (GX) bezeichneten Hüll-, beziehungsweise Pferchdurchmesser. Daneben werden in der Norm noch andere bisher nicht sehr

weit verbreitete Durchmesserarten beschrieben, insbesondere der Umfangsdurchmesser (CC), der Flächendurchmesser (CA) und der Volumendurchmesser (CV).

Einige der in der Norm beschriebenen Bestimmungsverfahren scheiden sofort allein auf Grund einfacher theoretischer Überlegungen von vornherein aus:

Das Zweipunkt-Maß (LP) ist als örtliches Maß per se kein Paarungsmaß, höchstens das Maß (LP)(SA), das heißt, der Mittelwert aus mehreren als Zweipunkt-Maß bestimmten Durchmessern.

Die Hülldurchmesser (GN) und Pferchdurchmesser (GX) geben üblicherweise die Paarungsmaße an, allerdings nur dann, wenn der Prüfling formstabil ist. Im nicht-formstabilen Fall [3] sind die Maße (GN) und (GX) stark von der veränderlichen Form des Prüfringes abhängig und scheiden daher ebenfalls von vornherein als gesuchtes Paarungsmaß des unverformten Ringes aus.

Ebenfalls stark von der veränderlichen Form der zu untersuchenden Ringe abhängig sind der Flächendurchmesser (CA) und der Volumendurchmesser (CV). Verbleiben als einzige Kandidaten für das gesuchte Paarungsmaß: der Gaußdurchmesser (GG) und der Umfangsdurchmesser (CC).

Die Prüfaufgabe

Der Messversuch, bei dem die Innendurchmesser von zwei Prüfringen aus Stahl in verschiedenen Verformungszuständen bestimmt wurden, konzentrierte sich auf folgende Durchmesserarten:

- i) Der Mittelwert (SA) des Zweipunktthroughmessers (LP), bestimmt in sechs gleichmäßig über den Umfang verteilten Winkelpositionen. Dieses Messverfahren wurde hier insbesondere deswegen untersucht, weil es das im Hause Rothe Erde bisher übliche Verfahren zum Bestimmen des Ringdurchmessers ist.
- ii) Der Gaußdurchmesser (GG). Dieser Durchmesser, der rechnerisch dem Mittelwert aller Zweipunkt-Maße entspricht, ist ein Quasi-Industriestandard, weil er sehr gute messtechnische Eigenschaften besitzt (insbesondere eine ausgezeichnete messtechnische Reproduzierbarkeit).
- iii) Der Umfangsdurchmesser (CC). Dieses Verfahren basiert vom Grundsatz her auf dem Bestimmen von großen Durchmessern mit Bandmaßen, wird allerdings in der Präzisionsfertigung bisher wegen der hohen Messunsicherheit des normalerweise verwendeten einfachen Messmittels so gut wie gar nicht praktiziert

Ergänzend wurden – quasi außer Konkurrenz – noch sowohl das Hüll-, als auch das Pferchmaß (GN), beziehungsweise (GX) mitgemessen, obwohl von vornherein klar war, dass beide Maße nicht dem gesuchten Paarungsmaß entsprechen würden.

Schließlich wurden zur Dokumentation des jeweiligen Verformungszustandes auch die auf den Gaußkreis bezogenen Rundheitsabweichungen RONT bestimmt.

Die Messeinrichtung

Die Messungen wurden von der FEINMESS GmbH in Bad Endbach auf einem kalibrierten und regelmäßig überwachten Koordinatenmessgerät vom Typ Leitz PMM 866 ausgeführt. Die Erfassung der Messwerte erfolgte scannend und taktil. Für jedes Messergebnis wurde die Messunsicherheit mit der Methode „Virtuelles Koordinatenmessgerät“ in der Softwareversion 4.4.4 gemäß VDI/VDE-Richtlinie 2617, Blatt 7, bestimmt.

Kalibrierung der Prüfringe

Zum Bestimmen der Durchmesser im unverformten Zustand wurden beide Prüfringe an drei gleichmäßig über den Umfang verteilten Punkten unterlegt und auf einen ebenen Werkstücktisch geklebt. Das Werkstückkoordinatensystem wurde messtechnisch aus der oben liegenden Stirnseite des jeweiligen Prüfringes und dem anschließend genauer zu bestimmenden Prüfdurchmesser abgeleitet. Um die Messunsicherheiten zu verringern, wurden die Durchmesser der unverformten Ringe als Mittelwerte aus jeweils 8 Messungen im sogenannten Mehrlagenverfahren bestimmt. Diese und die nachfolgenden Messungen wurden mit einem $\varnothing 5$ -Kugeltaster und einer (berechneten) Antastkraft von 0,5 N ausgeführt.

Fixierung und Verformung der Prüfringe

Speziell für diesen Versuch wurden zwei Werkstückaufnahmevorrichtungen konstruiert, mit denen die Prüfringe sowohl sicher in Messposition gehalten, als auch verformt werden konnten. Eine Vorrichtung (Bild 1) war so konstruiert, dass der Prüfring schrittweise gezielt in ein angenähertes Oval verformt werden konnte. Demgegenüber war die zweite Vorrichtung (Bild 2) so konstruiert, dass der Prüfring schrittweise gezielt in ein angenähertes Dreibogengleichdick verformt werden konnte, um auch den Einfluss der Art der Verformung auf die Messergebnisse studieren zu können.

Die Prüfringe wurden in die jeweilige Vorrichtung eingelegt und die der Fixierung und Verformung dienenden Messschrauben so weit angezogen, dass der betreffende Ring für den ersten Messdurchgang nach Gefühl kein Spiel mehr zum Bewegen hatte – der erste, quasi unverformte, Messzustand. Nach jedem Messvorgang wurden die Messschrauben 1 mm weiter angezogen. Insgesamt wurden zehn Zustände mit Zweipunkt-Verformung und fünf Zustände mit Dreipunkt-Verformung geprüft.

Der Messversuch

Abweichend von der Norm wurden alle Durchmesser nur in einer einzigen Ebene nahe der jeweiligen Symmetrieebene der Prüfringe gemessen, um bestmögliche Bedingungen für einen Vergleich der Messergebnisse zu gewährleisten.

In jedem Verformzustand wurden acht Messungen durchgeführt, deren Messpunkte zur Auswertung gemittelt wurden.

Nach der letzten Messung wurden die Messschrauben ganz gelöst und an beiden Ringen eine bleibende Restverformung festgestellt. Beide Ringe wurden wieder auf 3 Punkten aufgelegt und in dieser Position spannungsfrei gemessen.

Theoretische und praktische Vorkenntnisse

Auf Grund theoretischer Vorüberlegungen und rechnerischer Simulationen war klar, dass weder der Pferch- noch der Hülldurchmesser das gesuchte Paarungsmaß der in den unverformten Zustand zurückgeführten Ringe sein würde. Allerdings war ebenso klar, dass der gesuchte Paarungsdurchmesser, hier mit dem Symbol (CP) bezeichnet, irgendwo zwischen (GX) und (GN) liegen müsse, denn beide Durchmesser stehen für die am Umfang bestimmbaren Extremwerte des gesuchten Größenmaßes. Naheliegender ist es deshalb, den dazwischen liegenden mittleren Durchmesser des verformten Ringes als aussichtsreichen Kandidaten für das Paarungsmaß im unverformten Zustand anzusehen.

Konsequenterweise wurde und wird daher in Lippstadt das Paarungsmaß der Ringe als Mittelwert (LP)(SA) aus mehreren mit Stangenlehrensystemen gemessenen Zweipunkt- Durchmessern bestimmt (Bild 3). Die durch den Versuch zu klärende Frage ist allerdings: Beschreibt dieses Messergebnis wirklich das gesuchte Paarungsmaß im unverformten Zustand?

Die Erfahrung eines Herstellers von Blechgehäusen spricht dagegen: Trotz sorgfältiger Ermittlung der Gaußdurchmesser passten Blechdeckel häufig nicht auf die aus einer starken Verformung wieder in Form gebrachten Gehäuse. Ist also der Gaußdurchmesser (GG) nicht der gesuchte Funktionsdurchmesser? Aber welcher Durchmesser ist es dann?

Wie oben bereits erwähnt, stellt die Norm mit dem Umfangsdurchmesser (CC) noch einen weiteren aussichtsreichen Kandidaten zur Verfügung: Plausibel erscheint, dass die Länge der Umfangslinie, aus der dieser Durchmesser berechnet wird, beim Verformen eines Bauteilquerschnitts nahezu konstant bleibt und daher am ehesten mit dem gesuchten Paarungsmaß korreliert. Unklar ist nur, ob Gauß- und Umfangsdurchmesser an verformten Ringen überhaupt zu verschiedenen Messergebnissen führen würden. Die vor dem eigentlichen Messversuch ausgeführten theoretischen Simulationsberechnungen lieferten hierfür keine eindeutige Aussage.

Überraschende Versuchsergebnisse

Die mit äußerster Sorgfalt ausgeführten Versuchsergebnisse beantworten viele der gestellten Fragen und kommen – gemessen an den oben beschriebenen Vorerwartungen – einer kleinen Sensation gleich: Weder der Gauß- noch der Umfangsdurchmesser blieben bei zunehmender Verformung der beiden Versuchsringe gleich. Darüber hinaus zeigten ihre Messergebnisse ein diametral entgegengesetztes Verhalten: Während die gemessenen Gaußdurchmesser mit zunehmender Verformung der Ringe immer kleiner wurden, wuchs der Umfangsdurchmesser (Bilder 4 und 5). Überdies konnte in beiden unabhängig voneinander durchgeführten Versuchen ein klarer funktionaler Zusammenhang zwischen der gemessenen Rundheitsabweichung und den berechneten Differenzen zwischen Gauß- und Umfangsdurchmesser festgestellt werden (Bilder 6 und 7).

Diese Versuchsergebnisse können nicht durch die mit der Methode des virtuellen Koordinatenmessgerätes ermittelten Messunsicherheitsergebnisse erklärt werden. Denn diese Unsicherheiten lagen in einer Größenordnung von deutlich weniger als einem Hundertstel, während die Durchmesserabweichungen an den verformten Ringen in beiden Fällen ein bis zwei Zehntel Millimeter betragen. Auch Rechenfehler sind auszuschließen, denn die vom KMG angezeigten Durchmesser wurden von der Mahr Akademie in Göttingen stichprobenartig auf Basis der original gemessenen Punktkoordinaten nachgerechnet und verifiziert. (Unabhängig davon wurden einzelne vom KMG berechnete Gaußdurchmesser von der PTB in Braunschweig nachgeprüft und ebenfalls bestätigt.)

Da ein Teil der Formabweichungen auch noch nach dem Ende der Krafteinwirkung nachweisbar waren, handelte es sich bei den im Versuch gemessenen Formabweichungen an beiden Ringen nicht ausschließlich um elastische, sondern auch um plastische Verformungen.

Das Paarungsmaß verformter Ringe wird nicht allein durch gemittelte Durchmesser beschrieben

Die Tatsache, dass die berechneten Umfangsdurchmesser mit zunehmender Verformung immer größer wurden, beweist vor allen anderen Dingen eines: Mit zunehmender Verformung durch von außen auf die Ringe einwirkenden Kräfte vergrößern sich deren Umfangslängen. Dies ist deshalb überraschend, weil die Kräfte ja von außen nach innen wirken und daher von der Anschauung eher zu einer Verkleinerung der Umfangslinie beziehungsweise der Ringdurchmesser hätten führen müssen. Das Gegenteil ist jedoch nachweislich der Fall.

Wenn sich aber die Umfangslinie vergrößert, dann zwangsläufig auch das Paarungsmaß (CP). Da sowohl der mittlere Durchmesser (LP)(SA), als auch der Gaußdurchmesser (GG) im Versuch das entgegengesetzte Verhalten aufweisen, scheiden beide Durchmesser als Kandidaten für den gesuchten Funktionsdurchmesser aus.

Abschätzung des Paarungsmaßes im unverformten Zustand

Aus den soeben angestellten Überlegungen folgt aber nicht automatisch, dass damit nachgewiesen ist, dass nun allein der Umfangsdurchmesser (CC) das richtige Paarungsmaß im unverformten Zustand ist, auch wenn (CC) im Versuch das richtige Verhalten zeigt, nämlich mit zunehmender Verformung immer größer zu werden.

Vielmehr ist nur nachgewiesen, dass jede Verformung eines näherungsweise kreisförmigen Bauteilquerschnitts – egal, ob plastisch oder elastisch – zu einer Veränderung, genauer gesagt: zu einer Vergrößerung des Funktionsmaßes (CP) führen muss, denn es ist kaum anzunehmen, dass die Ringdurchmesser sich verkleinert hätten, wenn die Kräfte statt von außen nach innen von innen nach außen gewirkt hätten. Bei einem plastisch verformten Ring ist also davon auszugehen, dass sich das Paarungsmaß (CP) noch weiter vergrößert, wenn der Ring durch Einwirken entsprechender Kräfte wieder in einen unverformten Zustand überführt wird.

Auf Grund der erzielten Versuchsergebnisse erscheint jetzt plausibel, dass folgende Abschätzung gilt:

$$(1) \quad (CP) - (CC) \leq (CC) - D_0$$

Dabei sei D_0 der in der realen Welt unbekanntes Durchmesser des anfänglich unverformten Ringes, (CC) der messtechnisch bestimmbare Umfangsdurchmesser des verformten Ringes und (CP) das gesuchte Paarungsmaß des wieder in eine perfekte Kreisform überführten Ringes. Die Annahme (1) besagt nichts anderes, als dass sich der verformte Ring sehr wahrscheinlich wieder in einen unverformten Zustand überführen lässt, ohne dass die Änderungen der Umfangslänge größer sind als die Änderungen dieser Länge beim Erzeugen der am Ring gemessenen plastischen Verformungen.

Die Ungleichung (1) lässt sich wie folgt umformen:

$$(2) \quad (CP) \leq 2(CC) - D_0$$

Unter der Voraussetzung, dass die Verformungskräfte zuerst von außen auf den Ring einwirkten, wurde in beiden Versuchen gezeigt, dass der messtechnisch bestimmbare Gaußdurchmesser (GG) des verformten Ringes kleiner ist als der ursprüngliche Durchmesser D_0 des unverformten Ringes:

$$(3) \quad (GG) \leq D_0$$

Aus (2) und (3) folgt:

$$(4) \quad (CP) \leq 2(CC) - (GG)$$

Da außerdem angenommen werden darf:

$$(5) \quad (CC) \leq (CP)$$

erhält man am Ende folgende vollständige Plausibilitätsabschätzung für das gesuchte Paarungsmaß des in einen unverformten Zustand zurückgeführten Ringes:

$$(6) \quad (CC) \leq (CP) \leq 2(CC) - (GG)$$

Diese Abschätzung beruht ganz allein auf den beiden messbaren Durchmessern (CC) und (GG) und ist ein mit der Hilfe von Wahrscheinlichkeitsüberlegungen erzieltes Ergebnis des durchgeführten Versuches, bei dem die Ringe zuerst durch von außen nach innen wirkende Kräfte verformt wurden.

Gauß- und Umfangsdurchmesser beschreiben gemeinsam das vermutete Paarungsmaß

Am Ende ist es nicht ein Durchmesser allein, durch den das vermutete Paarungsmaß des zwangsweise herbeigeführten ideal kreisförmigen Zustandes von Wälzlagerringen im Einbauzustand beschrieben werden kann. Vielmehr liefern erst Gauß- und Umfangsdurchmesser gemeinsam eine vollständige Abschätzung dieses unbekanntes Funktionsdurchmessers, die umso genauer ist, je geringer die gemessenen Formabweichungen sind.

Zu beachten ist dabei, dass die Formel (6) nur für einen kräftefreien unverformten Zustand gilt, wie er im Wälzlager naturgemäß nicht gegeben ist. Deshalb und weil die hier hergeleitete Abschätzung noch an eine Vorbedingung bezüglich der Richtung der verformenden Kräfte geknüpft ist, sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die hier beschriebenen Versuchsergebnisse abzusichern.

Im separaten Rahmen:

[Der Ursprung von thyssenkrupp Rothe Erde ist die von Herrmann Kamp 1855 in Dortmund gegründete Paulinenhütte. Das Fertigungsprogramm des Eisen-, Hammer- und Walzwerkes umfasste zu jener Zeit die Fertigung von Achsen, Rädern, Beschlagteilen und Waggons für den Eisenbahnbereich aus selbsterzeugtem Eisen. 1861 übernimmt Carl Ruetz die Paulinenhütte und bringt den Namen „Rothe Erde“ aus Aachen nach Dortmund. 1934 ist mit Neugründung der Eisenwerk Rothe Erde GmbH der Beginn der Großwälzlagerfertigung. Im Zuge der Neuordnung der Eisen- und Stahlindustrie 1952 wird neben der Fertigung von Kugellenkränzen auch die Fertigung von Großwälzlager in das 1935 übernommene Werk Lippstadt verlegt. Eine Internationalisierung beginnt 1958 mit einer Vertriebsgesellschaft in England; heute gibt es weltweit insgesamt 16 Vertriebs- und Fertigungsgesellschaften. Neben der Errichtung eines modernen Ringwalzwerkes in Dortmund 1967 gehört thyssenkrupp Rothe Erde seit 1999 nach Zugehörigkeit zur Hoesch AG und Fried. Krupp AG heute zu thyssenkrupp.]

Abbildungen

Bild 1: Versuchsaufbau mit Vorrichtung zum ovalen Verformen eines Versuchsringes

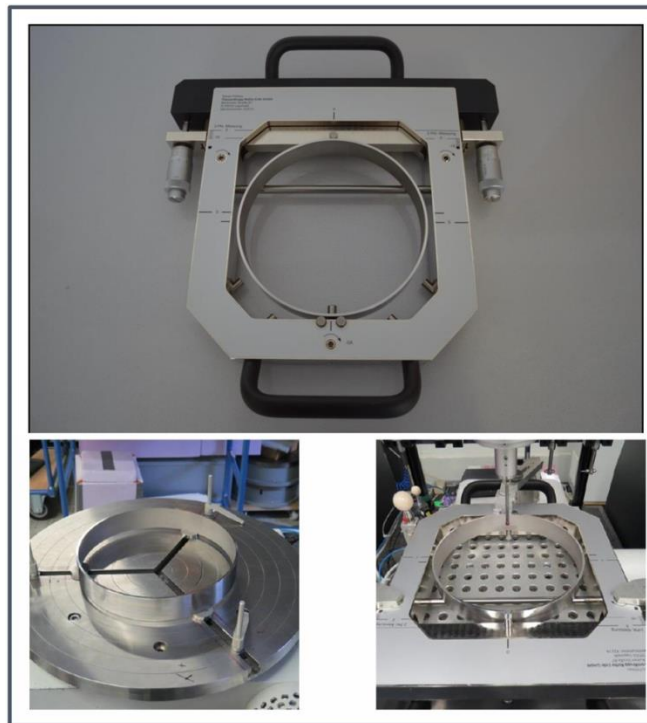


Bild 2: Versuchsaufbau mit Vorrichtung(schematisch) zur Dreipunkt-Verformung eines Versuchsringes

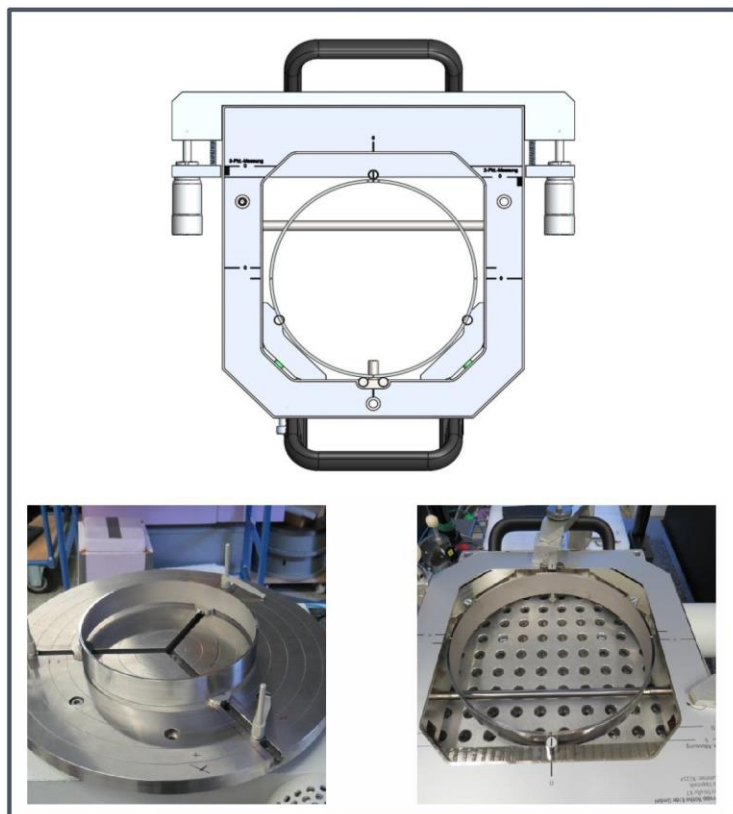


Bild 3: Messvorrichtung zum Bestimmen des Zweipunkt-Durchmessers großer Ringe



Bild 4: Gauß- und Umfangsdurchmesser bei ovaler Verformung

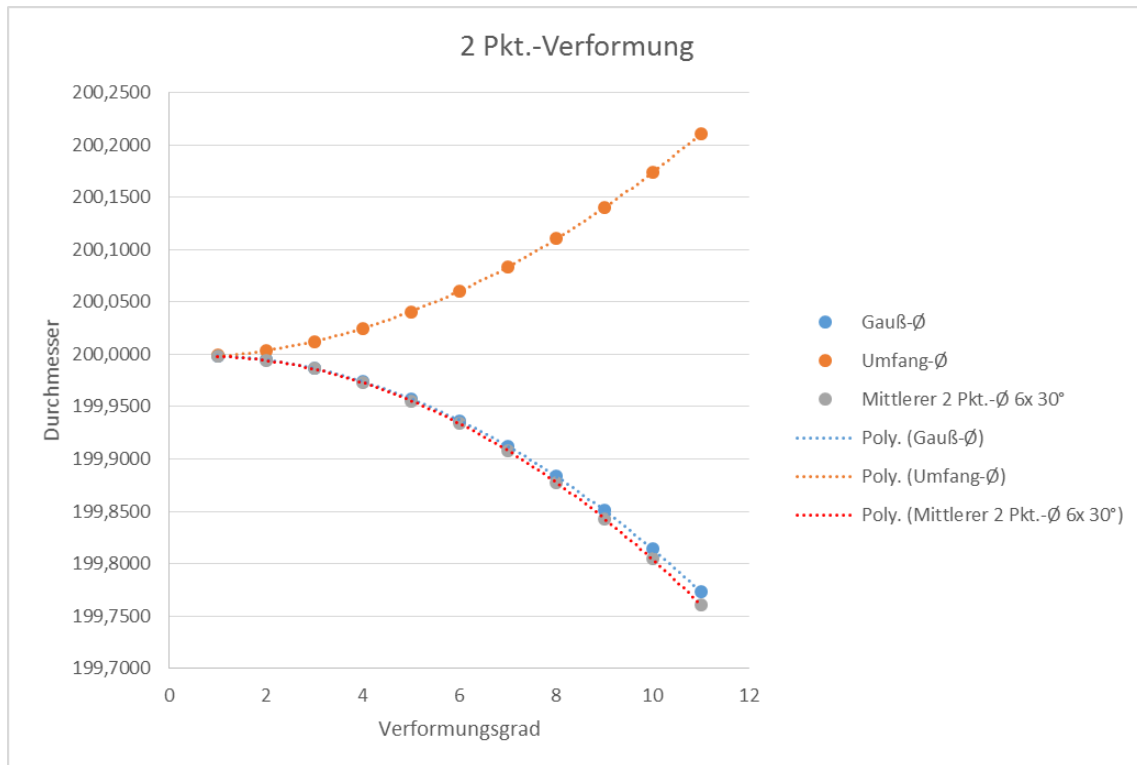


Bild 5: Gauß- und Umfangsdurchmesser bei Dreipunkt-Gleichdickverformung

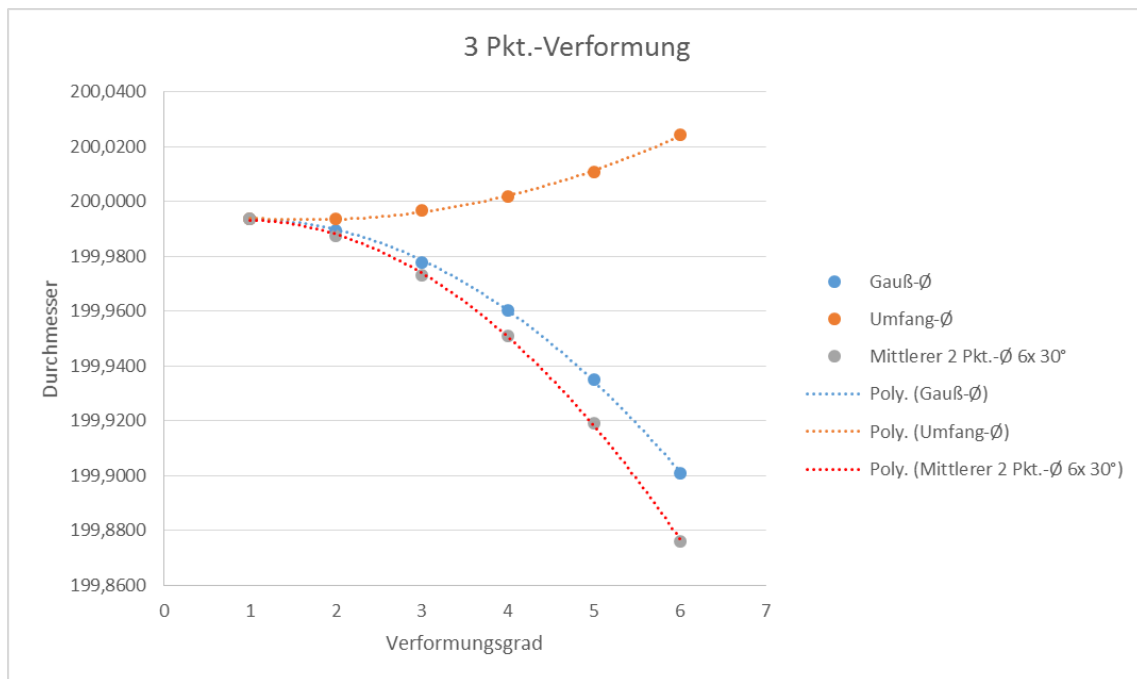


Bild 6: Durchmesserdifferenz (CC)-(GG) als Funktion der Rundheitsabweichung am ovalen Ring

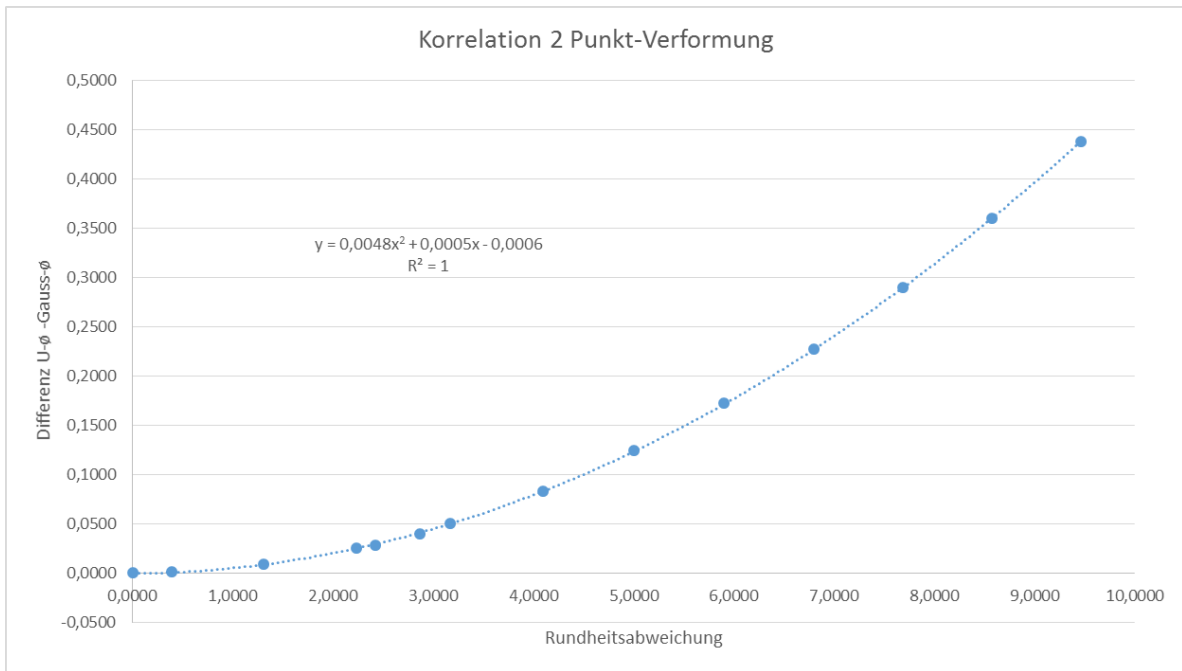
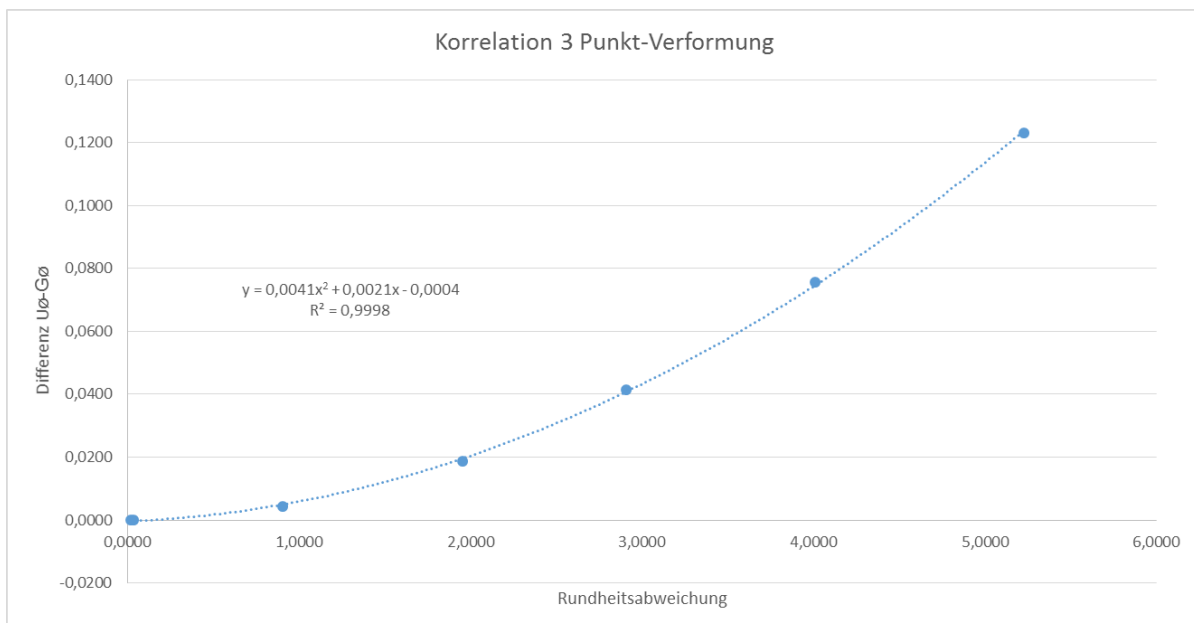


Bild 7: Durchmesserdifferenz (CC)-(GG) als Funktion der Rundheitsabweichung am Dreibogen-Gleichdick



Literatur

- [1] DIN V ENV 13005:1999-06: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Vornorm. Beuth Verlag, Berlin 1999
- [2] DIN EN ISO 14405-1:2014-01: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Dimensionelle Tolerierung - Teil 1: Lineare Größenmaße
- [3] Die Herren der Ringe: Qualitätssicherung von großen und hochwertigen Bauteilen: Werkstückeinfluss, Tobias Felstau, thyssenkrupp Rothe Erde GmbH Lippstadt 2014

Autoren

Dipl.-Ing. Tobias Felstau, geb. 1971; Sachbearbeiter der QS für Prüf- und Messwesen, thyssenkrupp Rothe Erde GmbH, Lippstadt.

Dipl. Ing. (FH) Michael Trenk, geb. 1956; Inhaber und Geschäftsführer der FEINMESS GmbH & Co. KG, Bad Endbach

Dr. rer. nat. Rainer Bartelt, geb. 1952; seit 2001 Leiter der Mahr Akademie der Mahr GmbH, Göttingen

Kontakt

Tobias Felstau
Tel. +49(0)2941 741 6263
E-Mail: tobias.felstau@thyssenkrupp.com